



Gdański Uniwersytet Medyczny

Rozprawa doktorska

„Czujniki inercyjne i telemedycyna

jako narzędzia monitorowania i ewaluacji w patologiach kręgosłupa”

Justyna Małgorzata Fercho

Promotor: dr hab. n. med. Tomasz Szmuda

Katedra i Klinika Neurochirurgii,

Katedra i Klinika Kardiochirurgii

Gdański Uniwersytet Medyczny

Gdańsk 2023

PODZIĘKOWANIA

Promotorowi - dr hab. n. med. Tomaszowi Szmudzie

Za poświęcony czas, wsparcie, naukę, przyjaźń i wieloletnią współpracę.

prof. dr hab. med. Pawłowi Słoniewskiemu

Za możliwość rozwoju i zaufanie

dr hab. n. med., prof. uczelni Grzegorzowi Miękiśiakowi

Za ciągłe inspiracje oraz wsparcie merytoryczne

Opiekunowi specjalizacji - dr n. med. Wojciechowi Karolakowi

Za pielęgnowanie ambicji, szacunek do ciężkiej pracy i wsparcie

Dziadkowi Pawłowi

Za rozwijanie ciekawości Świata od najmłodszych lat

Rodzinie: Rodzicom - Agnieszce i Andrzejowi,

Dziadkom: Irenie, Grażynie, Bronisławie i Lechowi

Za miłość, wyrozumiałość i cierpliwość

Wszystkim pracownikom UCK w Gdańsku,

z którymi miałam przyjemność współpracować;

Pacjentom i ich rodzinom

Studentom

Wsparcie projektu (granty):

w dniu 10 maja 2021r. Minister Edukacji i Nauki zakwalifikował do finansowania projekt badawczy „Ocena zastosowania urządzeń mobilnych w monitorowaniu leczenia schorzeń kręgosłupa” (SKN/SP/498545/2021) złożony w ramach inicjatywy MNiSW „Studenckie koła naukowe tworzą innowacje”.

SPIS TREŚCI

I. WYKAZ PRAC WCHODZĄCYCH W SKŁAD ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	5
II. WYKAZ STOSOWANYCH SKRÓTÓW.....	7
III. STRESZCZENIE W JĘZYKU POLSKIM	8
IV. STRESZCZENIE W JĘZYKU ANGIELSKIM	9
V. WPROWADZENIE	15
VI. CELE PRACY.....	15
VII. OMÓWIENIE PUBLIKACJI WCHODZĄCYCH W SKŁAD ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	16
VIII. PODSUMOWANIE CAŁOŚCI ROZPRAWY	27
IX. PIŚMIENNICTWO.....	29
X. PUBLIKACJE WCHODZĄCE W SKŁAD ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	33

I. WYKAZ PRAC WCHODZĄCYCH W SKŁAD ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

1. Praca oryginalna

Autorzy: **Fercho Justyna, Krakowiak Michał, Yuser Rami, Szmuda Tomasz, Zieliński Piotr, Szarek Dariusz, Miękiśiak Grzegorz**

tytuł artykułu: **Kinematic Analysis of the Forward Head Posture Associated with Smartphone Use**

Nazwa czasopisma, rok, doi: **Symmetry 2023, 15(3), 667;**
<https://doi.org/10.3390/sym15030667>

IF 2.94 | MNiSW 70.000 | Q2

2. Praca oryginalna

Autorzy: **Miękiśiak Grzegorz, Załuski Rafał, Szarek Dariusz, Pettersson Samuel, Fercho Justyna, Druszcz Adam, Pezowicz Celina, Odintsov Sergei, Mink Janos**

tytuł artykułu: **The Symmetry of Lower Back Pain as a Potential Screening Factor for Serious Pathology: A Survey Study**

Nazwa czasopisma, rok, doi: **Symmetry 2021, 13(11), 1994;**
<https://doi.org/10.3390/sym13111994>

IF 2.94 | MNiSW 70.000 | Q2

3. Praca oryginalna

Autorzy: **Fercho Justyna, Krakowiak Michał, Yuser Rami, Szmuda Tomasz, Zieliński Piotr, Szarek Dariusz, Pettersson Samuel, Miękiśiak Grzegorz**

tytuł artykułu: **Evaluation of Movement Restriction of Spinal Orthoses Using Inertial Measurement Units**

Nazwa czasopisma, rok, doi: **Int J Environ Res Public Health. 2022 Dec 8;19(24):16515. doi: 10.3390/ijerph192416515.**

Do marca 2023

IF 4,614 | MNiSW 140.000 | Q1

Od marca 2023

| MNiSW 140.000 | Q2

4. Global Spine Congress 2023 in Prague - Poster session (Evaluation of Spinal Orthoses Using Inertial Measurement Units)

5. Evolving advancements in Spine - "Backbone for a healthy life" - Nov 20-21, 2023, at Dubai, UAE (Effectiveness of Spinal Orthoses assessed with Inertial Measurement Units)

Łączna wartość wskaźnika oddziaływania (IF): **5.88 (do marca 2023 10,494)**

Łączna punktacja MNiSW: **280.000**

II. WYKAZ STOSOWANYCH SKRÓTÓW

PROM (ang. *Patient Reported Outcome Measures*)

MSDs (ang. Musculoskeletal disorders)

IMU (ang. inertial measurement unit)

LBP (ang. Low Back Pain)

RF (ang. Red flags)

PMs (ang. pain maps)

ODI (ang. Oswestry Disability Index)

COMI (ang. Core Outcome Measures Index)

SI (ang. Symmetry Index)

ASG (ang. Asymmetric Pain Group)

SPG (ang. Symetric Pain Group)

TLSO (ang. Thoracic-Lumbar-Sacral Orthosis)

III. STRESZCZENIE W JĘZYKU POLSKIM

1. Kinematic Analysis of the Forward Head Posture Associated with Smartphone Use

Badanie skupione zostało wokół zespołu szyi tekstowej odnoszącego się do początku zwyrodnienia kręgosłupa szyjnego spowodowanego długotrwałym używaniem urządzeń mobilnych przy złej postawie. Celem tego badania jest określenie, który region parametrów szyi jest głównie odpowiedzialny za zginanie podczas użytkowania smartfona. W badaniu wykorzystano 9-osiove czujniki (IMU) wraz z aplikacją mobilną rejestrującą wyniki pomiarów. Badanie miało na celu analizę zgięcia odcinka szyjnego kręgosłupa podczas korzystania ze smartfona podczas siedzenia, stania i chodzenia. W badaniu tym zidentyfikowano region o największym wpływie na zgięcie do przodu wzdłuż parametrów odcinka szyjnego podczas różnych zadań związanych z korzystaniem ze smartfona. Chociaż wartość w stopniach zgięcia stawu C0-C1 i odcinka podosiowego nie różniła się znacznie między różnymi zadaniami wykonywanymi przez osoby badane, różnice były nadal znaczące. Wyniki badania mogą zapewnić dokładniejsze biomechaniczne zrozumienie wpływu używania smartfona na kręgosłup szyjny.

2. The Symmetry of Lower Back Pain as a Potential Screening Factor for Serious Pathology: A Survey Study.

Mapy bólu jako narzędzia przesiewowe w przypadku poważnych schorzeń podstawowych. W badaniu oceniono symetrię bólu jako cechę wyróżniającą, respondentów podzielono na dwie grupy z symetrycznymi i asymetrycznymi schematami bólu, które następnie porównano pod względem częstości występowania sygnałów ostrzegawczych dla poważnych patologii oraz niesprawności związanej z bólem mierzonej za pomocą narzędzi COMI i ODI. Zbadano korelację niepełnosprawności związanej z bólem i wzorca bólu. Wykazano, że symetria bólu jest skorelowana z występowaniem sygnałów ostrzegawczych i niesprawności związanej z bólem.

3. Evaluation of Movement Restriction of Spinal Orthoses Using Inertial Measurement Units.

W trzecim badaniu wykonano ocenę ruchomości kręgosłupa podczas noszenia trzech różnych rodzajów ortez ortopedycznych podczas wykonywania pewnych podstawowych zadań za pomocą 9-osioowych czujników umieszczanych pod ortezą. Każde urządzenie było noszone zgodnie z wcześniejszymi instrukcjami i dostosowywane indywidualnie dla każdego pacjenta. Pomiar rejestrowane były w aplikacji na smartfonie badacza.

Badanych poproszono o wykonanie następujących zadań: stanie, chodzenie, siedzenie oraz podniesienie przedmiotu z ziemi za pomocą tylko jednej ręki z założonymi wyżej aparatami. Dane dotyczące przemieszczenia strzałkowego analizowano przy każdym zadaniu, a ponadto mierzono względną rotację między czujnikami dla zadania podnoszenia. Punktem wyjścia do analizy gibkości była postawa stojąca. Uczestnicy zostali również poproszeni o wypełnienie pięciopunktowego kwestionariusza typu Likerta dotyczącego subiektywnego dyskomfortu odczuwanego podczas użytkowania każdej z ortez.

Zmierzona sztywność miękkich aparatów była istotnie wyraźna podczas wykonywania zadań dowolnych w porównaniu ze sztywnością obserwowaną w zadaniach mimowolnych.

IV. WYKAZ OSIĄGNIĘĆ W PRACY NAUKOWO-BADAWCZEJ:

1. Oryginalne opublikowane naukowe prace twórcze:

1.1. Fercho, J.; Krakowiak, M.; Yuser, R.; Szmuda, T.; Zieliński, P.; Szarek, D.; Miękiński, G. Kinematic Analysis of the Forward Head Posture Associated with Smartphone Use. *Symmetry* 2023, 15, 667.

<https://doi.org/10.3390/sym15030667>

1.2. Miękiński, G.; Załuski, R.; Szarek, D.; Pettersson, S.D.; Fercho, J.; Druszcz, A.; Pezowicz, C. The Symmetry of Lower Back Pain as a Potential Screening Factor for Serious Pathology: A Survey Study. *Symmetry* 2021, 13, 1994.

<https://doi.org/10.3390/sym13111994>

1.3. Fercho, J.; Krakowiak, M.; Yuser, R.; Szmuda, T.; Zieliński, P.; Szarek, D.; Petterson, S.D.; Miękiśiak, G. Evaluation of Movement Restriction of Spinal Orthoses Using Inertial Measurement Units. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 16515. <https://doi.org/10.3390/ijerph192416515>

1.4. Miękiśiak G, Fercho J, Petterson SD, Szmuda T, Słoniewski P. Impact of COVID-19 on incidence and treatment of intracranial aneurysms in Poland: a national study. *Neurol Neurochir Pol.* 2022;56(1):96-100. doi: 10.5603/PJNNS.a2022.0006. Epub 2022 Jan 11. PMID: 35014691.

1.5. Krakowiak, M.; Fercho, J.; Piwowska, K.; Yuser, R.; Szmuda, T.; Słoniewski, P. YouTube as a Source of Patient Information for Meningiomas: A Content Quality and Audience Engagement Analysis. *Healthcare* 2022, 10, 506. <https://doi.org/10.3390/healthcare10030506>

1.6. Meyer-Szary, J.; Luis, M.S.; Mikulski, S.; Patel, A.; Schulz, F.; Tretiakow, D.; Fercho, J.; Jaguszewska, K.; Frankiewicz, M.; Pawłowska, E.; et al. The Role of 3D Printing in Planning Complex Medical Procedures and Training of Medical Professionals—Cross-Sectional Multispecialty Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 3331. <https://doi.org/10.3390/ijerph19063331>

1.7. Miękiśiak, G.; Petterson, S.D.; Szarek, D.; Morasiewicz, P.; Fercho, J.; Adamski, S.; Kipiński, L.; Szmuda, T. Acute Stroke Care during COVID-19: National Data. *Infect. Dis. Rep.* 2022, 14, 198–204. <https://doi.org/10.3390/idr14020024>

1.8. Krakowiak, M.; Fercho, J.M.; Szmuda, T.; Piwowska, K.; Och, A.; Sawicki, K.; Krystkiewicz, K.; Modliborska, D.; Kierońska, S.; Och, W.; et al. Relevance of Routine Postoperative CT Scans Following Aneurysm Clipping—A

Retrospective Multicenter Analysis of 423 Cases. *J. Clin. Med.* 2022, 11, 7082.
<https://doi.org/10.3390/jcm11237082>

1.9. Fercho, J.; Krakowiak, M.; Yuser, R.; Szmuda, T.; Zieliński, P.; Szarek, D.; Miękiśiak, G. The Incidence and Risk Factors for Allogeneic Blood Transfusions in Pediatric Spine Surgery: National Data. *Healthcare* 2023, 11, 533. <https://doi.org/10.3390/healthcare11040533>

1.10. Szarek D, Miękiśiak G, Szmuda T, Fercho J, Petterson S, Kipiński L. The impact of the COVID-19 pandemic on the number of brain tumor surgeries in Poland: A national database study. *Adv Clin Exp Med.* 2023 Apr 24. doi: 10.17219/acem/161726. Epub ahead of print. PMID: 37093089.

1.11. The impact of the COVID-19 pandemic on the number of brain tumor surgeries in Poland: A national database study, DOI: 10.17219/acem/161726

2. Udział w konferencji krajowych i zagranicznych:

a) czynny:

- XI Kongres Polskiego Towarzystwa Kardio-Torakochirurgów (1-3 czerwca 2023, Bydgoszcz) - sesja posterowa: "Redo Aortic Valve Replacement via Right Anterior Mini Thoracotomy. A case series - new approach to redo-AVR surgery"
- XI Kongres Polskiego Towarzystwa Kardio-Torakochirurgów (1-3 czerwca 2023, Bydgoszcz) - prezentacja ustna „Totalna korpsektomia Th2 ze zmodyfikowanego dostępu piersiowego”
- Global Spine Congress 2023 in Prague - sesja posterowa (Evaluation of Spinal Orthoses Using Inertial Measurement Units)
- Zjazd Oddziału Pomorskiego Polskiego Towarzystwa Neurochirurgów (16/17.06.23) - prezentacja ustna „Czujniki inercyjne i telemedycyna jako narzędzia monitorowania i ewaluacji w patologjach kręgosłupa”

- Evolving advancements in Spine - "Backbone for a healthy life" - Nov 20-21, 2023, at Dubai, UAE (Effectiveness of Spinal Orthoses assessed with Inertial Measurement Units) - prezentacja ustna.

a) bierny:

- XVI Kongres Polskiego Towarzystwa Transplantacyjnego.

3. Nagrody, wyróżnienia itp.:

- XI Kongres Polskiego Towarzystwa Kardio-Torakochirurgów (1-3 czerwca 2023, Bydgoszcz) - prezentacja ustna „Totalna korpektomia Th2 ze zmodyfikowanego dostępu piersiowego” - I miejsce w sesji torakochirurgicznej.

4. Udział w dodatkowych projektach badawczych, realizowanych oprócz tematu pracy doktorskiej:

- Sztuczna Inteligencja i splotowe sieci neuronowe w predykcji występowania tętniaków wewnątrzczaszkowych oraz ocenie ryzyka ich pęknięcia. - projekt przy współpracy z Politechniką Gdańską.
- COMPARISON OF OUTCOMES AND QUALITY OF LIFE FOR MINIMALLY INVASIVE AORTIC VALVE REPLACEMENT TECHNIQUES: RAT MINI AVR vs. MINI STERNOTOMY AVR: A RANDOMIZED CONTROLLED TRIAL - Study Coordinator (Klinika Kardiochirurgii UCK)

5. Doświadczenie w badaniach klinicznych:

-Prospektywne, randomizowane, kontrolowane, wielośrodkowe badanie uszczelniacza opony twardej ArtiFascia® Dural w porównaniu z dostępnymi na rynku substytutami opony twardej. **Badanie NEOART** (Koordynator badania)

-Prospektywne, wielośrodkowe, podwójnie zaślepienie, randomizowane, kontrolowane z placebo, badanie fazy 3 w grupach równoległych w celu oceny skuteczności i bezpieczeństwa leku Clazosentan u pacjentów w celu zapobiegania pogorszeniu stanu klinicznego z powodu opóźnionego niedokrwienia mózgu (DCI), u dorosłych z krwawieniem

podpajęczynówkowym z pękniętego tętniaka (aSAH) **Clazosentan / ACT-108475** (Koordynator badania oraz Współbadacz)

6. Inne

- ukończenie cyklu Kursów Leczenia Małoinwazyjnego Leczenia Bólów Kręgosłupa metodą Termolezji, maj 2023.
- Członek Zespołu Transplantacyjnego oraz Koordynator przeszczepu Płuca-Serce (grudzień 2022 oraz czerwiec 2023)
- wprowadzenie doraźnej terapii bólów kręgosłupa metodą neurolizy u pacjentów kwalifikowanych do transplantacji płuc w Uniwersyteckim Centrum Klinicznym Gdańskiego Uniwersytetu Medycznego.

7. W ramach projektu „Sztuczna Inteligencja i splotowe sieci neuronowe w predykcji występowania tętniaków wewnątrzczaszkowych oraz ocenie ryzyka ich pęknięcia.” obroniono następujące prace magisterskie:

7.1.PG 2022

- Jakub Cieślak, "Ocena ryzyka pęknięcia tętniaka mózgu przy wykorzystaniu modelu klasyfikacyjnego XGBoost", dyplom roku 2022 na WFTiMS PG
- Katarzyna Filipowicz, "Ocena ryzyka pęknięcia tętniaka mózgu przy wykorzystaniu modelu klasyfikacyjnego opartego na regresji logistycznej"
- Wojciech Przybylski, "Ocena ryzyka pęknięcia tętniaka mózgu przy wykorzystaniu modelu klasyfikacyjnego SVM"
- Joanna Świerzbina, "Ocena ryzyka pęknięcia tętniaka mózgu przy wykorzystaniu modelu klasyfikacyjnego LightGBM"

7.2.PG 2023

- Emilia Murawiejko, "Określanie prawdopodobieństwa przynależności pacjentów do grupy ryzyka pod względem występowania tętniaka mózgu przy użyciu modelu klasyfikacyjnego LightGBM"

-Szymon Pawłowski, "Opracowanie metod uczenia maszynowego wspierających wykrywanie tętniaków mózgu poprzez wyszukiwanie i analizę jednostek nazewniczych w dokumentacji medycznej"

-Szymon Langer, "Określanie prawdopodobieństwa przynależności pacjentów do grupy ryzyka pod względem występowania tętniaka mózgu przy użyciu modelu klasyfikacyjnego SVM" (praca złożona i czeka na obronę)

7.3.UG 2023

Katarzyna Kowalska, "Diagnostyka tętniaków mózgu na podstawie wyników badań laboratoryjnych krwi przy użyciu metod uczenia maszynowego"

Research Interest Score --- 81.6

h-index --- 5

Impact Factor --- 22.725

Łączna wartość punktacji MEiN --- 1140

V. WPROWADZENIE

Ból kręgosłupa jest schorzeniem cywilizacyjnym, jednym z największych problemów zdrowotnych w krajach wysoko uprzemysłowionych. Uważa się, że nawet 80% populacji doświadcza tej dolegliwości przynajmniej raz w ciągu życia. Pomimo powszechnego występowania nadal stosunkowo niewiele wiadomo na temat patomechanizmu bólu a co za tym idzie efekty leczenia często są niezadowalające.

Od lat podstawowym narzędziem oceny wpływu dolegliwości bólowych kręgosłupa na funkcjonowanie są kwestionariusze pacjentów PROM (ang. *Patient Reported Outcome Measures*). Są to standardowe zestawy pytań lub zagadnień klinicznych dostosowane do określonego schorzenia: np. bólu kręgosłupa, depresji czy bólu głowy. Wraz z rozwojem urządzeń przenośnych i ich szerokim rozpowszechnieniem pojawiły się nowe możliwości realnej oceny dolegliwości pacjentów w czasie rzeczywistym. Obecnie przyjętym standardem postępowania jest wypełnianie kwestionariusza w trakcie wizyty lekarskiej. Podejście to ma jedną wadę: reprezentuje wspomnienie pacjenta, który opisuje ostatnie dni/tygodnie swojego życia. Udostępniając pacjentowi do ręki interaktywne narzędzie, które może być wykorzystane na żądanie, w dowolnych okolicznościach można uzyskać bardziej miarodajny zestaw danych. Ponadto, poprzez ciągły monitoring dolegliwości, można niemal natychmiast wychwycić pogorszenie stanu zdrowia, które może wymagać pilnej interwencji lekarskiej.

VI. CELE PRACY

Celem rozprawy doktorskiej jest ocena wykorzystania czujników inercyjnych oraz map bólu (telemedycyny) jako narzędzi monitorowania i ewaluacji schorzeń kręgosłupa.

Cele szczegółowe:

- zlokalizowanie obszaru o największym zgięciu w odcinku szyjnym kręgosłupa i zbadanie roli symetrii w utrzymaniu pozycji podczas korzystania

ze smartfonów (cel osiągnięto w publikacji: Kinematic Analysis of the Forward Head Posture Associated with Smartphone Use)

- ocena zastosowania map bólu jako narzędzi przesiewowych dla poważnych schorzeń podstawowych, przy uwzględnieniu symetrii bólu jako możliwej cechy wyróżniającej (cel osiągnięto w publikacji: The Symmetry of Lower Back Pain as a Potential Screening Factor for Serious Pathology: A Survey Study)

-ocena ruchomości kręgosłupa podczas noszenia trzech różnych ortez ortopedycznych przy wykonywaniu podstawowych czynności (cel osiągnięto w publikacji: Evaluation of Movement Restriction of Spinal Orthoses Using Inertial Measurement Units)

VII. OMÓWIENIE PUBLIKACJI WCHODZĄCYCH W SKŁAD ROZPRAWY

DOKTORSKIEJ

1. Kinematic Analysis of the Forward Head Posture Associated with Smartphone Use

Zaburzenia układu mięśniowo-szkieletowego (Musculoskeletal disorders, MSDs) są główną przyczyną nieobecności w pracy oraz utraty funkcji społecznej w państwach członkowskich Unii Europejskiej (1). Do najczęstszych biomechanicznych czynników ryzyka należą między innymi nadmierna powtarzalność i nieergonomiczne pozycje (2). Badania z ostatnich lat wykazały pozytywną korelację między bólem mięśniowo-szkieletowym a korzystaniem ze smartfonów (3–7).

Powszechne, długotrwałe korzystanie z elektronicznych urządzeń przenośnych budzi duże zaniepokojenie szkodliwym wpływem czasu spędzanego przed ekranem i wymuszonej przez to postawy ciała na obciążenie kręgosłupa szyjnego. Badania kliniczne wykazały, że dzieci i młodzież z uporczywym bólem mięśniowo-szkieletowym są częściej narażone na ból przewlekły w wieku dorosłym (8–10). Obecnie ból szyi przewyższa inne dobrze znane problemy zdrowotne nastolatków, takie jak nadużywanie substancji, wypadki drogowe i astma, plasując się na 8.

miejscu pod względem liczby lat przeżytych z niepełnosprawnością u osób w wieku od 15 do 19 lat (11). Stosunkowo nowe schorzenie zwane „zespołem szyi tekstowej” odnosi się do początku zwyrodnienia kręgosłupa szyjnego spowodowanego długotrwałym korzystaniem z urządzeń mobilnych przy złej postawie ciała (12). Objawy kliniczne zespołu szyi tekstowej wahają się od bólu mięśniowo-szkieletowego o różnym stopniu natężenia, do uszkodzeń neurologicznych wpływających na wzrok, układ oddechowy oraz układ krążenia. Pomimo objawów zespołu, mechanizm degeneracji odcinka szyjnego kręgosłupa nie został jednoznacznie udowodniony.

Niniejsze badanie miało na celu zidentyfikowanie regionu kręgosłupa szyjnego z maksymalnym zgięciem podczas korzystania ze smartfona, przy zastosowaniu 9-osiowych inercyjnych jednostek pomiarowych (IMU). Ponadto przyjrzelśmy się symetrii głowy i szyi, która może odgrywać rolę w rozwoju bólu szyi i ramion, jak sugeruje artykuł Xie i wsp. (13).

W badaniu wzięto udział 25 osób (11 kobiet i 15 mężczyzn) pracujących lub studiujących w Gdańskim Uniwersytecie Medycznym. Średnia wieku wyniosła 23,36 lat. Kryteria wykluczenia z badania obejmowały: choroby kręgosłupa, urazy i operacje kręgosłupa w wywiadzie, ból kręgosłupa, ubytki neurologiczne, objawy wskazujące na proces patologiczny w obrębie kręgosłupa. Każdy uczestnik wyraził pisemną zgodę przed przystąpieniem do pomiarów. Badanie zostało zatwierdzone przez lokalną komisję etyczną Gdańskiego Uniwersytetu Medycznego (NKBBN/145/2021) i było zgodne z Deklaracją Helsińską.

W badaniu wykorzystano 9-osiowe jednostki do nawigacji inercyjnej (inertial measurement unit, IMU) MetaMotionR (MMR-MbientLab, San Francisco, CA, USA). IMU składa się z 6-osiowego akcelerometru + żyroskopu i 3-osiowego magnetometru do 9-osiowej fuzji czujników w czasie rzeczywistym. Wykorzystanie MMR i aplikacji mobilnej odbierającej dane IMU zostało wcześniej udowodnione jako wiarygodne w pomiarach zgięcia/wyprostu kręgosłupa (14,15). Aby skalibrować pomiary, aplikacja Physics Toolbox Sensor Suite Pro w wersji 1.9.1 (MbientLab) została zainstalowana na smartfonie badającego i połączona z trzema IMU przez Bluetooth. Użyto łącznie 4 IMU, z których każdy był mocno przymocowany

taśmą do jednego z 4 miejsc: skóra nad zewnętrzną wyniosłością potyliczną, poniżej prawego wyrostka sutkowatego, tuż poniżej wyrostka kolczystego C7 oraz na tylnej powierzchni smartfona uczestnika. 3 IMU przymocowane powierzchownie do pacjenta umożliwiły podzielenie analizy zgięcia kręgosłupa na trzy części: staw szczytowo-potyliczny (C0-C1), poziomy kręgow C2-C7 i tułów. Czwarty czujnik został podłączony do smartfona osoby badanej w celu obliczenia bezwzględnego kąta nachylenia ekranu.

Pacjenci byli badani w trzech pozycjach: siedzącej, stojącej i chodzącej. Każdemu wykonano cztery pomiary. Pierwszy pomiar (M1) był fazą kalibracji, podczas której badani siedzieli na krześle bez skrzyżowanych nóg i patrzyli prosto przed siebie przez 5 minut. M1 była neutralną pozycją zerową, ponieważ wymagała minimalnego wydatku energetycznego, a głowa, szyja i tułów w tej pozycji są ustawione w jednej linii z resztą kręgosłupa. Dane z IMU podczas M1 zostały zaimplementowane we wszystkich kolejnych pomiarach jako współrzędne odniesienia. Drugi pomiar (M2) wymagał od badanych pisania tekstu na smartfonie jedną ręką przez 5 minut. Trzeci pomiar (M3) wymagał od badanych stania przez 15 s podczas korzystania ze smartfona trzymanego w jednej ręce. Czwarty pomiar (M4) wymagał od badanego przejścia 10 m we własnym tempie podczas pisania SMS-a jedną ręką. Wektory zgięcia do przodu były oceniane w odniesieniu do wektora z fazy kalibracji (M1). M2, M3 i M4, które obejmowały korzystanie ze smartfona i wymagały od badanych stałego kontaktu wzrokowego z telefonem. Podczas wszystkich 4 pomiarów badani nie mówili ani nie wykonywali żadnych dodatkowych ruchów.

Dane z każdego IMU zostały wykorzystane do obliczenia zgięcia odcinka szyjnego podzielonego na dwa segmenty: połączenie czaszkowo-szyjne (C0-C1) i segment podosiowy (C2-C7). Ze względu na ograniczony ruch kręgosłupa piersiowego, punktem odniesienia był tułów. IMU przymocowany do wyrostka kolczystego C7 (IMU-3) zapewnia dane dotyczące zgięcia tułowia, wyrażone jako kąt bezwzględny uzyskany ze skalibrowanego wektora Eulera. IMU przymocowany poniżej wyrostka sutkowatego (IMU-2) został potraktowany jako najwyższy punkt poziomów kręgow C2-C7 (w przybliżeniu na poziomie kręgu C1). Na jego umiejscowienie nie ma wpływu zgięcie głowy.

Dane z IMU-2 i IMU-3 zostały wykorzystane do pomiaru zgięcia segmentu C2-C7 i zostały obliczone według następującego wzoru:

$$\theta_{\text{subaxial}} = (\beta - \alpha)$$

θ_{subaxial} - stopień zgięcia poziomu C2-C7

β - zmiana nachylenia wykrywana przez IMU-2

α - zmiana nachylenia wykrywana przez IMU-3

Dane z IMU przymocowanego do zewnętrznej wyniosłości potylicznej (IMU-1) wraz z IMU-2 zostały wykorzystane do obliczenia zgięcia stawu C0-C1.

$$\theta_{\text{head}} = (\gamma - \beta)$$

θ_{head} - zgięcie stawu C0-C1

γ - zmiana nachylenia wykrywana przez IMU-1

Do analizy symetrii wykorzystano wartość odchylenia (γ). Wykorzystanie połączenia danych z poszczególnych mierników wbudowanych w czujniki pozwoliło na wyznaczenie bezwzględnego azymutu dla każdego urządzenia, zarejestrowany dla każdego IMU podczas zadań M1 (kalibracja - wartość neutralna) i M2. Wartość inklinacji głowy zostało obliczone przez odjęcie kursu IMU-1 od odpowiedniej wartości IMU-3.

W badaniu wykazaliśmy, że staw C0-C1 miał największy udział w zgięciu do przodu spośród dwóch analizowanych segmentów odcinka szyjnego kręgosłupa. Analizując średnie kąty zgięcia podczas siedzenia

i chodzenia, staw C0-C1 był jedynym czynnikiem przyczyniającym się do zgięcia w odcinku szyjnym, ponieważ w segmencie C2-C7 zaobserwowano jedynie wydłużenie. Średnie zgięcie w odcinku szyjnym kręgosłupa było podobne we wszystkich wykonywanych zadaniach.

Porównując kąty zgięcia dla każdego zadania, statystycznie istotne różnice wystąpiły przy porównywaniu kąta stawu C0-C1 do segmentu C2-C7 i tułowia ($p < 0,0001$). Dodatkowo, jednokierunkowa ANOVA potwierdziła znaczącą różnicę w pozycji smartfona podczas każdego z trzech zadań ($p < 0,005$). Pomimo zmian w pozycji smartfona podczas każdego pomiaru, pozycja głowy pozostała nie zmieniona. Jednocześnie, zgięcie stawu C0-C1 było znacznie większe niż zgięcie segmentu C2-C7 i tułowia w każdym z wykonywanych zadań ($p < 0,001$).

W odniesieniu do symetrii, charakterystyczny wzorzec ruchu głowy odnotowano u 20 z 25 badanych podczas zadania M2. Mianowicie, występował piłokształtny ruch odchylenia w trakcie okresu pomiarowego, z zauważalnymi fazami wolnymi i szybkimi. Podczas jednostronnego pisania wiadomości tekstowych głowa powoli obraca się w kierunku symetrycznej konfiguracji z szybką fazą korekcyjną. Faza wolna była przeciwna do ruchu wskazówek zegara (w lewo) u wszystkich osób, z wyjątkiem jednej. Średnia amplituda oscylacji wynosiła $19,77^\circ$ (zakres 15,58-28,13); średnia częstotliwość wynosiła 12,57 mHz (zakres 4,03-35,44). Korelacja częstotliwości z zakresem zgięcia szyi oceniana za pomocą współczynnika Spearmana była istotna statystycznie ($p < 0,001$). Nie wykazano korelacji między amplitudą oscylacji a zakresem zgięcia szyi. W fazie kalibracji M1 odnotowano jedynie losowe fluktuacje o niskiej amplitudzie.

Przyszłe badania powinny skupić się na tym, jak ten wzorzec wpływa na złożoną biomechanikę kręgosłupa szyjnego. Poprawiając uogólnienie i spójność obecnych ustaleń dotyczących biomechaniki korzystania ze smartfonów zmierzamy w kierunku osiągnięcia świadomości społecznej na temat potencjalnych długoterminowych zagrożeń związanych ze złą postawą ciała.

2. The Symmetry of Lower Back Pain as a Potential Screening Factor for Serious Pathology: A Survey Study.

Ból dolnej części pleców (LBP) to złożony stan obejmujący kości, mięśnie i nerwy w pobliżu odcinka lędźwiowo-krzyżowego kręgosłupa. Co warto podkreślić, jest to jedna z głównych przyczyn niepełnosprawności na całym świecie (16, 17) , a roczna zapadalność waha się od 1,5 do 36% populacji ogólnej (18). Jednocześnie LBP jako objaw jest wysoce niejednoznaczny. W większości przypadków przyczyna jest łagodna i wymaga leczenia zachowawczego. W innych przypadkach jest to spowodowane poważną patologią, w której szybka i dokładna diagnoza ma kluczowe znaczenie. Istotnym problemem w codziennej praktyce jest sposób badania przesiewowego pacjentów w celu określenia, czy wymagają oni poszerzenia diagnostyki. Współczesne wytyczne zawierają zalecenie, aby wstępna ocena kliniczna koncentrowała się na identyfikacji tak zwanych „czerwonych flag” (ang. Red flags, RF) w celu badania przesiewowego w kierunku określonych chorób, takich jak nowotwór, infekcja i złamanie kręgosłowa (19). Jedną z podstawowych cech jest lokalizacja bólu, która w pewnym stopniu pozwala przewidzieć jego źródło (20). Główną metodą uzyskiwania informacji o dokładnej lokalizacji bólu są mapy bólu (ang. pain maps, PMs). Udowodniono, że ocena rozkładu bólu za pomocą rysunków bólu jest klinicznie istotną i wiarygodną metodą (21–23). Mapy bólu są obecnie zaawansowanymi cyfrowymi aplikacjami zdrowotnymi, torującymi drogę do nowych dróg podstawowych zastosowań translacyjnych i klinicznych. Kluczową zaletą elektronicznej mapy bólu jest bardzo potrzebna możliwość analizy wyników zaraz po zakończeniu rysowania, bez konieczności pracochłonnej digitalizacji (24). Można to dodatkowo wzmocnić za pomocą metod eksploracji danych i uczenia maszynowego, aby umożliwić natychmiastową ocenę nawet bardzo dużych zbiorów danych.

W tym badaniu przeanalizowano wzorce LBP pod kątem symetrii bólu. Cała grupa badana została podzielona na dwie grupy: wysoce symetryczne i asymetryczne wzorce bólu. Głównym celem było porównanie częstości występowania RF między grupami. Celem drugorzędowym była ocena niepełnosprawności związanej z bólem w każdej grupie. Mapa bólu z odpowiednimi miarami niepełnosprawności zgłaszanymi przez pacjentów została uruchomiona jako otwarta ankieta internetowa, która została

opracowana jako rozbudowana aplikacja internetowa wykorzystująca technologię JavaScript po stronie klienta i skrypty PHP po stronie serwera. Kwestionariusz PROM został podzielony na następujące cztery etapy: pierwszy zawierał informacje na temat podstawowych danych demograficznych i czasu trwania objawów (pięć pytań), drugi został podzielony na cztery kategorie: mniej niż 7 dni, 7 dni-4 tygodnie, 4 tygodnie-3 miesiące i ponad 3 miesiące. Następnie użyto kwestionariuszy: Niepełnosprawności Oswestry (ODI) (10 pozycji), Core Outcome Measures Index (COMI) (6 pozycji), RF (3 pozycje) i cyfrowy PM. Następujące czynniki uznano za RF: niewyjaśniona utrata masy ciała, gorączka trwająca dłużej niż 3 dni i uraz w wywiadzie. PM został umieszczony jako ostatni krok ankiety. Była to interaktywna sylwetka 2D przedstawiająca całe ciało, którą można było oglądać z przodu lub z tyłu. Każdy obraz był plikiem GIF o średnicy 435 × 600 pikseli. Obrazy były dostosowane do płci. Użytkownicy mogli wykonać dowolną liczbę oznaczeń.

Dane wykorzystane w niniejszym badaniu zostały zebrane w okresie od 1 września 2013 r. do 25 czerwca 2016 r. Nie rejestrowano żadnych informacji, które mogłyby prowadzić do identyfikacji respondentów, w tym adresów IP. Z tego samego powodu nie używano plików cookie. Do oceny ruchu w sieci wykorzystano Google Analytics (Google Inc., Mountain View, CA, USA). Ankieta internetowa została stworzona zgodnie z listą kontrolną do raportowania wyników ankiet internetowych. Od każdego uczestnika uzyskano wcześniej świadomą zgodę. Ankieta została umieszczona w tematycznym portalu internetowym na temat chorób kręgosłupa. Zawartość portalu została zatwierdzona przez Polskie Towarzystwo Chirurgii Kręgosłupa. Osoby badane zostały zrekrutowane spośród internautów odwiedzających stronę. Kryteria wyjściowe były następujące: minimalny wiek 18 lat i ból pleców jako najbardziej uciążliwy problem. Ten ostatni został określony na podstawie pierwszego pytania kwestionariusza COMI, które brzmiało: "Który z poniższych problemów dokucza Ci najbardziej?", z następującymi możliwymi odpowiedziami: (a) ból pleców; (b) ból nogi/pośladka; (c) zaburzenia czucia w plecach/nodze/pośladku, np. mrowienie, "mrowienie" i drętwienie; lub (d) żaden z powyższych. Do badania włączono tylko osoby, które wybrały odpowiedź "a".

Przeanalizowaliśmy symetrię w odniesieniu do linii środkowej, obliczając wskaźnik symetrii (SI) oznaczeń bólu, który został obliczony dla każdego pacjenta przy użyciu wzoru zaproponowanego przez Herzoga i wsp. (25). Na podstawie poprzedniego badania (26) oszacowano, że d Cohena wynosi 0,2; w związku z tym obliczona minimalna wielkość próby wynosiła 786, aby osiągnąć moc statystyczną 0,80. Do celów tego badania wybraliśmy wartość SI równą 20 jako próg między grupą bólu symetrycznego (SPG - $AI \leq 20$) a grupą bólu asymetrycznego (ASG - $AI > 20$). Integralność danych została oceniona poprzez obliczenie parametru alfa Cronbacha dla ODI.

Od 1 września 2013 r. do 25 czerwca 2016 r. stronę internetową zawierającą kwestionariusz odwiedziło łącznie 4213 użytkowników. W tym czasie 3621 respondentów wypełniło kwestionariusz. W tej grupie 1418 osób wybrało "ból pleców" jako najbardziej dokuczający problem. Spośród respondentów, którzy wybrali "ból pleców", 1018 zaznaczyło co najmniej trzy punkty w wyznaczonym obszarze (w obrębie konturów sylwetki od połowy klatki piersiowej do poziomu kolan), stanowiąc ostateczną liczbę osób uwzględnionych w analizie. Łącznie zaznaczono 4650 punktów. Każdy respondent zaznaczył średnio 4,57 punktu.

W 439 przypadkach ból był symetryczny ($AI \leq 20$) (grupa bólu symetrycznego (SPG)), a w 579 przypadkach był asymetryczny ($AI > 20$) (grupa bólu asymetrycznego (APG)). Stosunek F/M w pierwszej grupie wynosił 44,42/55,58, a w drugiej 52,68/47,32. Różnica nie była istotna statystycznie. Respondenci w grupie SPG byli nieco starsi ze średnią (SD) wieku 41,57 (11,64) w porównaniu do 40,57 (12,02) w grupie APG; jednak różnica nie była znacząca. Mediana czasu trwania bólu wynosiła ponad 3 miesiące, bez różnicy między grupami. Ból w APG powodował znacznie większą niepełnosprawność niż w SPG, mierzoną za pomocą wszystkich instrumentów. Wszystkie różnice były istotne statystycznie. Pod względem RF, w APG był istotnie większy odsetek respondentów, którzy zadeklarowali historię urazu (21,41 vs. 10,71 %). Przeciwnie, pozostałe RF - utrata masy ciała (6,70 vs. 1,76) i gorączka (4,91 vs. 2,14 %) - były istotnie częstsze w SPG. Wewnętrzna spójność danych była wysoka, z wartością alfa Cronbacha wynoszącą 0,90 dla ODI i 0,84 dla COMI.

Było to pierwsze badanie dotyczące symetrii bólu pleców przy użyciu PM. Wykazano, że APG i SPG wykazują charakterystyczne cechy, takie jak częstość występowania RF i niepełnosprawność związana z bólem. Dokładne znaczenie kliniczne wymaga dalszej walidacji.

3. Evaluation of Movement Restriction of Spinal Orthoses Using Inertial Measurement Units.

Ortezy kręgosłupowe to zewnętrzne aparaty ortopedyczne stosowane jako pomoc w unieruchamianiu kręgosłupa w różnych schorzeniach. W oparciu o ich funkcję, ortozy można podzielić na trzy kategorie: ortozy podtrzymujące (w przypadku tymczasowego bólu), ortozy unieruchamiające (w przypadku silnego bólu, np. urazu kręgosłupa i leczenia pooperacyjnego) oraz ortozy korekcyjne (głównie dla pacjentów pediatrycznych z idiopatyczną deformacją kręgosłupa). Istnieją specjalne ortozy dla każdego odcinka kręgosłupa (np. szyjnego, piersiowego, lędźwiowego, krzyżowego oraz ich kombinacje). Ortezy są również stosowane jako uzupełnienie po leczeniu chirurgicznym kręgosłupa piersiowo-lędźwiowego. Usztywnienie kręgosłupa ma trzy główne cele (27): kontrolę bólu poprzez ograniczenie ruchu, a także poprzez odciążenie określonych struktur kręgosłupa (dyski, trzony kręgów); stabilizację osłabionych lub uszkodzonych struktur; oraz zapewnienie trzypunktowego podparcia w celu skorygowania i zapobiegania progresji deformacji.

Skuteczność ortez pozostaje kontrowersyjna w przypadku większości zastosowań, z wyjątkiem deformacji o niskim stopniu zaawansowania u nastolatków (28). Nie ma wystarczających dowodów na poparcie stosowania ortez kręgosłupa w złamaniach odcinka piersiowo-lędźwiowego (29) i ostrych osteoporotycznych złamaniach kompresyjnych kręgów (30), mimo to, są one nadal stosowane ze względu na racjonalne podejście do unieruchomienia uszkodzonego narządu. Nasze badanie miało na celu ocenę ruchomości kręgosłupa podczas noszenia trzech różnych rodzajów ortez ortopedycznych podczas wykonywania podstawowych czynności.

W badaniu wzięło udział 10 osób pracujących lub uczących się w Gdańskim Uniwersytecie Medycznym. Kryteria włączenia z badania obejmowały brak przebytych chorób kręgosłupa, operacji kręgosłupa lub

urazu; brak bólu w odcinku piersiowo-lędźwiowym; brak deficytów neurologicznych; oraz wszelkie inne objawy, które mogłyby wskazywać na patologiczny proces upośledzający ruchomość kręgosłupa. Uczestnicy znajdowali się w zdrowym przedziale wagowym (wskaznik masy ciała (BMI) między 18,5 a 24,9) i nie byli obciążeni chorobami, które mogłyby wpływać na układ mięśniowo-szkieletowy lub pogarszać jego sprawność. Każdy uczestnik podpisał pisemną zgodę przed wzięciem udziału w badaniu. Lokalna komisja etyczna zatwierdziła badanie na Gdańskim Uniwersytecie Medycznym (NKBBN/145/2021). 9-osiowe inercyjne jednostki pomiarowe (IMU) MetaMotionR (Mbiendlab, San Francisco, CA, USA) zostały trwale przymocowane do trzech różnych punktów na ciele badanego. Pierwszy został przymocowany do najbardziej widocznego wyrostka kolczystego w odcinku szyjnym (zazwyczaj na poziomie C7), drugi do najniższej położonego punktu wklęsłości lędźwiowej (zazwyczaj na kręgu L3), a trzeci został przymocowany w połowie drogi między dwoma wyżej wymienionymi punktami (około T8). Następnie obliczono dwie wartości: różnicę między nachyleniami C7 i L3 (C7L3) oraz między nachyleniami T8 i L3 (T8L3). W badaniu zastosowano trzy typy ortez: ortezę Jewetta, ortezę typu Hohmanna i stałą ortezę kręgosłupa piersiowo-lędźwiowego (TLSO). Pierwsza z nich to trzypunktowa orteza kontrolująca zgięcie (przeprost), druga to półsztywny gorset, a ostatnia to trójpłaszczyznowy gorset stabilizujący ze sztywną ramą. Każde urządzenie było noszone zgodnie z ustalonymi instrukcjami i dostosowywane indywidualnie dla każdego pacjenta. Aplikacja Physics Toolbox Sensor Suite Pro w wersji 1.9.1 (Mbiendlab) została zainstalowana na smartfonie badacza i połączona z IMU przez Bluetooth w celu kalibracji i rejestracji pomiarów. Badani zostali poproszeni o wykonanie następujących zadań: stanie, chodzenie, siedzenie i podnoszenie przedmiotu z ziemi przy użyciu tylko jednej ręki podczas noszenia wyżej wymienionych ortez. Dane dotyczące przemieszczenia strzałkowego zostały przeanalizowane dla każdego zadania, a dodatkowo zmierzono względną rotację między czujnikami dla zadania podnoszenia. Punktem odniesienia dla analizy elastyczności była postawa stojąca. Uczestnicy zostali również poproszeni o wypełnienie pięciopunktowego

kwestionariusza PROM (typu Likerta) dotyczącego subiektywnego dyskomfortu odczuwanego podczas korzystania z każdej z ortez.

Dane z ćwiczeń siedzenia i chodzenia wykazały, że TLSO zapewniała największe ograniczenie zarówno dla T8L3, jak i C7L3. Orteza Hohmanna uległa maksymalnemu przemieszczeniu podczas siedzenia z ruchem w C7L3 wynoszącym 15,18 stopnia (SD 3,21) i w T8L3 wynoszącym 8,97 stopnia (SD 2,72). Podczas chodzenia TLSO zapewniała największe ograniczenie ruchu w płaszczyźnie strzałkowej. Mobilność była minimalna podczas korzystania z tej ortyzy: C7L3 wynosiła 3,07 stopnia, a T8L3 1,12 stopnia. Różnica w wartościach dla TLSO była statystycznie istotna. Różniła się ona znacząco od ortyzy Hohmanna i Jewetta. Co ciekawe, dla dynamicznego zadania podnoszenia przedmiotu z podłogi, najbardziej sztywne ortyzy (unieruchomieniem, aparatem) była ortyza (ortyza ortyza, coś do zmiany polonistycznie) Hohmanna, a TLSO okazała się najmniej skuteczna. Maksymalne przemieszczenie dla pierwszej z nich w C7L3 wynosiło 1,29 stopnia, a w T8L3 3,31 stopnia. Różnica w maksymalnym zakresie między dwiema ortyzami była istotna statystycznie. Odnosząc się do rotacji, ruch w obszarze TL został prawie wyeliminowany podczas stosowania zarówno ortyzy Hohmanna, jak i TLSO przy T8L3, odpowiednio 0,98 stopnia i 0,69 stopnia. Różnica ta nie była istotna statystycznie. Zaobserwowano znacznie większy ruch całego segmentu C7L3, z najwyższą wartością 3,99 stopnia dla ortyzy Hohmanna i najniższą dla TLSO wynoszącą 1,71 stopnia. Według ankiety najwygodniejszą ortyzą okazała się ta typu Hohmanna, która uzyskała średnią ocen 4,50. Aparaty TLSO i Jewett były znacznie mniej komfortowe, uzyskując odpowiednio 3,27 i 3,30.

Podsumowując, zmierzona sztywność aparatów miękkich była istotnie większa podczas wykonywania zadań dobrowolnych w porównaniu ze sztywnością obserwowaną w zadaniach mimowolnych.

VIII. PODSUMOWANIE CAŁOŚCI ROZPRAWY

W pierwszym badaniu (Kinematic Analysis of the Forward Head Posture Associated with Smartphone Use) wykazaliśmy, że staw C0-C1 miał największy udział w zgięciu do przodu w odcinku szyjnym kręgosłupa. Zbadaliśmy również rolę symetrii w utrzymaniu pozycji podczas korzystania ze smartfonów, odnotowując charakterystyczny wzorzec ruchu głowy podczas jednostronnego pisania wiadomości tekstowych: głowa powoli obraca się w kierunku symetrycznej konfiguracji z szybką fazą korekcyjną. Warto dodać, że w niniejszym badaniu korzystne byłoby zarejestrowanie powierzchniowego EMG, zwłaszcza w odniesieniu do zwiększonej pracy mięśni szyi podczas oscylacji głowy.

W drugim badaniu (The Symmetry of Lower Back Pain as a Potential Screening Factor for Serious Pathology: A Survey Study) oceniliśmy zastosowanie map bólu jako narzędzi przesiewowych dla poważnych schorzeń podstawowych, przy uwzględnieniu symetrii bólu jako możliwej cechy wyróżniającej. Wykazaliśmy, że grupa bólu asymetrycznego (APG) i grupa bólu symetrycznego (SPG) prezentują charakterystyczne cechy, takie jak częstość występowania czerwonych flag i niepełnosprawność związana z bólem. Aby w przyszłości powiązać wzorce bólu z poważną przyczyną, wymagana jest walidacja kliniczna.

W badaniu trzecim (Evaluation of Movement Restriction of Spinal Orthoses Using Inertial Measurement Units) dokonaliśmy oceny ruchomości kręgosłupa podczas noszenia trzech różnych ortez kręgosłupowych przy wykonywaniu podstawowych czynności, wykazując, że sztywność aparatów miękkich była istotnie większa podczas wykonywania zadań dobrowolnych w porównaniu ze sztywnością obserwowaną w zadaniach mimowolnych. W pomiarach nie uwzględniliśmy zmian ciśnienia w jamie brzusznej. Wydaje się, że monitorowanie tej wartości zapewniłoby pozytywne wsparcie dla ustaleń przedstawionych w niniejszym badaniu.

Warto również zaznaczyć, że w badaniu pierwszym i trzecim podczas pomiarów oceniano mobilność kręgosłupa u zdrowych osób, która może różnić się od oceny pacjentów zgłaszających się do lekarza. Z drugiej strony takie podejście zmniejsza heterogeniczność i pozwala skupić się wyłącznie na właściwościach mechanicznych ortez.

W ostatnich latach technologia stojąca za czujnikami IMU znacznie się poprawiła. Wśród postępów przelotem było włączenie technologii łączenia czujników za stosunkowo niewielką cenę (350 zł za czujnik), ponieważ umożliwiło precyzyjny pomiar bezwzględnego położenia kątownego w dowolnej płaszczyźnie. Ich miniaturyzacja wraz z możliwością bezprzewodowego przesyłania danych zaowocowała ich zastosowaniem w wielu ostatnich badaniach biomechanicznych, w tym w kilku badaniach dotyczących kręgosłupa co niewątpliwie daje nadzieje na powszechniejsze ich wykorzystanie. Dodatkowo, zastosowanie map bólu umożliwia sprawne prowadzenie diagnostyki, monitorowania oraz ewaluacji metod leczenia patologii kręgosłupa przy zastosowaniu telemedycyny.

IX. PIŚMIENICTWO

1. Bevan S. Economic impact of musculoskeletal disorders (MSDs) on work in Europe. *Best Pract Res Clin Rheumatol* [Internet]. 2015 Jun 1 [cited 2023 Nov 6];29(3):356–73. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26612235/>
2. Da Costa BR, Vieira ER. Risk factors for work-related musculoskeletal disorders: A systematic review of recent longitudinal studies. *Am J Ind Med* [Internet]. 2010 Mar [cited 2023 Nov 6];53(3):285–323. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19753591/>
3. Derakhshanrad N, Yekaninejad MS, Mehrdad R, Saberi H. Neck pain associated with smartphone overuse: cross-sectional report of a cohort study among office workers. *Eur Spine J* [Internet]. 2021 Feb 1 [cited 2023 Nov 6];30(2):461–7. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33108531/>
4. Al-Hadidi F, Bsisu I, AlRyalat SA, Al-Zu'bi B, Bsisu R, Hamdan M, et al. Association between mobile phone use and neck pain in university students: A cross-sectional study using numeric rating scale for evaluation of neck pain. *PLoS One* [Internet]. 2019 May 1 [cited 2023 Nov 6];14(5). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31107910/>
5. Alsalamah A, Harisi M, Alduayji M, Almutham A, Mahmood F. Evaluating the relationship between smartphone addiction/overuse and musculoskeletal pain among medical students at Qassim University. *J Fam Med Prim care* [Internet]. 2019 [cited 2023 Nov 6];8(9):2953. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31681674/>
6. Mustafaoglu R, Yasaci Z, Zirek E, Griffiths MD, Ozdincler AR. The relationship between smartphone addiction and musculoskeletal pain prevalence among young population: a cross-sectional study. *Korean J Pain* [Internet]. 2021 [cited 2023 Nov 6];34(1):72–81. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33380570/>
7. Fares J, Fares M, Fares Y. Musculoskeletal neck pain in children and adolescents: Risk factors and complications. *Surg Neurol Int* [Internet]. 2017 [cited 2023 Nov 6];8(1). Available from: [/pmc/articles/PMC5445652/](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31681674/)

8. Jones GT, Silman AJ, Power C, Macfarlane GJ. Are common symptoms in childhood associated with chronic widespread body pain in adulthood? Results from the 1958 British Birth Cohort Study. *Arthritis Rheum* [Internet]. 2007 May [cited 2023 Nov 6];56(5):1669–75. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17469161/>
9. Brattberg G. Do pain problems in young school children persist into early adulthood? A 13-year follow-up. *Eur J Pain* [Internet]. 2004 [cited 2023 Nov 6];8(3):187–99. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15109969/>
10. Hestbaek L, Leboeuf-Yde C, Kyvik KO, Manniche C. The course of low back pain from adolescence to adulthood: eight-year follow-up of 9600 twins. *Spine (Phila Pa 1976)* [Internet]. 2006 Feb [cited 2023 Nov 6];31(4):468–72. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16481960/>
11. VizHub - GBD Compare [Internet]. [cited 2023 Nov 6]. Available from: <https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/>
12. David D, Giannini C, Chiarelli F, Mohn A. Text Neck Syndrome in Children and Adolescents. *Int J Environ Res Public Health* [Internet]. 2021 Feb 2 [cited 2023 Nov 6];18(4):1–14. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34414771/>
13. Xie YF, Szeto G, Madeleine P, Tsang S. Spinal kinematics during smartphone texting - A comparison between young adults with and without chronic neck-shoulder pain. *Appl Ergon* [Internet]. 2018 Apr 1 [cited 2023 Nov 6];68:160–8. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29409630/>
14. Zhuang L, Wang L, Xu D, Wang Z, Liang R. Association between excessive smartphone use and cervical disc degeneration in young patients suffering from chronic neck pain. *J Orthop Sci* [Internet]. 2021 Jan 1 [cited 2023 Nov 6];26(1):110–5. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32205018/>
15. Beange KHE, Chan ADC, Beaudette SM, Graham RB. Concurrent validity of a wearable IMU for objective assessments of functional movement quality and control of the lumbar spine. *J Biomech* [Internet]. 2019 Dec 3 [cited 2023 Nov 6];97. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31668717/>
16. Meucci RD, Fassa AG, Xavier Faria NM. Prevalence of chronic low back pain: systematic review. *Rev Saude Publica* [Internet]. 2015 [cited 2023 Nov 6];49.

Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26487293/>

17. Singh K, Andersson GBJ. Low back pain. *Handb Clin Neuroepidemiology* [Internet]. 2007 [cited 2023 Nov 6];344(5):167–77. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11172169/>
18. Hoy D, Brooks P, Blyth F, Buchbinder R. The Epidemiology of low back pain. *Best Pract Res Clin Rheumatol* [Internet]. 2010 Dec [cited 2023 Nov 6];24(6):769–81. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21665125/>
19. Koes BW, Van Tulder M, Lin CWC, Macedo LG, McAuley J, Maher C. An updated overview of clinical guidelines for the management of non-specific low back pain in primary care. *Eur Spine J* [Internet]. 2010 [cited 2023 Nov 6];19(12):2075–94. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20602122/>
20. Airaksinen O, Brox JI, Cedraschi C, Hildebrandt J, Klüber-Moffett J, Kovacs F, et al. Chapter 4. European guidelines for the management of chronic nonspecific low back pain. *Eur Spine J* [Internet]. 2006 Mar [cited 2023 Nov 6];15 Suppl 2(Suppl 2). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16550448/>
21. Depalma MJ, Ketchum JM, Trussell BS, Saullo TR, Slipman CW. Does the location of low back pain predict its source? *PM R* [Internet]. 2011 Jan [cited 2023 Nov 6];3(1):33–9. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21257131/>
22. Boudreau SA, Royo AC, Matthews M, Graven-Nielsen T, Kamavuoko EN, Slabaugh G, et al. Distinct patterns of variation in the distribution of knee pain. *Sci Rep* [Internet]. 2018 Dec 1 [cited 2023 Nov 6];8(1). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30410031/>
23. Bertilson BC, Grunnesjö M, Johansson SE, Strender LE. Pain drawing in the assessment of neurogenic pain and dysfunction in the neck/shoulder region: inter-examiner reliability and concordance with clinical examination. *Pain Med* [Internet]. 2007 Mar [cited 2023 Nov 6];8(2):134–46. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17305685/>
24. Shaballout N, Neubert TA, Boudreau S, Beissner F. From Paper to Digital

- Applications of the Pain Drawing: Systematic Review of Methodological Milestones. *JMIR mHealth uHealth* [Internet]. 2019 [cited 2023 Nov 6];7(9). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31489841/>
25. Eysenbach G. Improving the quality of web surveys: The Checklist for Reporting Results of Internet E-Surveys (CHERRIES). *J Med Internet Res* [Internet]. 2004 Sep 29 [cited 2023 Nov 6];6(3):e132. Available from: <https://www.jmir.org/2004/3/e34>
 26. Miekisiak G, Latka D, Sobolewski T, Sulewski A, Kubaszewski L, Kaczmarczyk J. Prevalence of “Red Flags” Among the Internet User with Low Back Pain Seeking Information on Spinal Health—A Web Survey. *Telemed e-Health* [Internet]. 2015 Jan 30 [cited 2023 Nov 6];21(2):120–4. Available from: <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/tmj.2013.0372>
 27. Weppner JL, Alfano AP. Principles and Components of Spinal Orthoses. *Atlas Orthoses Assist Devices*. 2019 Jan 1;69-89.e2.
 28. Kaelin AJ. Adolescent idiopathic scoliosis: indications for bracing and conservative treatments. *Ann Transl Med* [Internet]. 2020 Jan [cited 2023 Nov 6];8(2):28–28. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32055619/>
 29. Schwab F. Treatment with or without an Orthosis is Equivalent for Thoracolumbar Burst Fracture without Neurologic Injury. *J Bone Joint Surg Am* [Internet]. 2015 [cited 2023 Nov 6];97(16):1374. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26290091/>
 30. Kato T, Inose H, Ichimura S, Tokuhashi Y, Nakamura H, Hoshino M, et al. Comparison of Rigid and Soft-Brace Treatments for Acute Osteoporotic Vertebral Compression Fracture: A Prospective, Randomized, Multicenter Study. *J Clin Med* [Internet]. 2019 [cited 2023 Nov 6];8(2). Available from: </pmc/articles/PMC6406237/>

X. PUBLIKACJE WCHODZĄCE W SKŁAD ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Article

Kinematic Analysis of the Forward Head Posture Associated with Smartphone Use

Justyna Fercho ^{1,*}, Michał Krakowiak ¹, Rami Yuser ², Tomasz Szmuda ¹, Piotr Zieliński ¹,
Dariusz Szarek ³ and Grzegorz Miękiński ⁴

¹ Neurosurgery Department, Medical University of Gdansk, 80-214 Gdansk, Poland

² Scientific Circle of Neurology and Neurosurgery, Medical University of Gdansk, 80-214 Gdansk, Poland

³ Department of Neurosurgery, Marciniaks Hospital, 54-049 Wrocław, Poland

⁴ Institute of Medicine, Opole University, 45-052 Opole, Poland

* Correspondence: jfercho@uck.gda.pl

Abstract: Background: Frequent use of mobile devices has a known association with musculoskeletal neck pain. This study sought out to localize the region with greatest flexion in the cervical spine and explored the role of symmetry in maintaining the pose during texting. Methods: Three inertial measuring units (IMUs) superficially attached along the cervical spine divided the cervical spine into two measurable segments. Twenty-five subjects participated in the study and performed three tasks when using smartphones: sitting, standing, and walking. Data from each IMU were used to calculate the flexion of cervical divided into two segments: craniocervical junction (C0–C1) and subaxial (C1–C7). Results: The greatest flexion by far occurred at C0–C1. While sitting, standing, and walking, the mean flexion angles were $33.33 \pm 13.56^\circ$, $27.50 \pm 14.05^\circ$, and $32.03 \pm 10.03^\circ$ for the C0–C1 joint and $-3.30 \pm 10.10^\circ$, $2.50 \pm 9.99^\circ$, and $-1.05 \pm 11.88^\circ$ for the C2–C7 segment, respectively. There is a noticeable pattern of yaw movement of the head, with a slow rotation toward symmetry and a fast corrective movement toward the smartphone held in one hand. Conclusions: This study identified the region of greatest contribution toward forward flexion along the cervical parameters during various tasks involving smartphone use. With each task, the greatest contributor to head flexion was the C0–C1 joint. There is involuntary rotation of the cervical spine toward symmetry when texting.

Keywords: spine; motion analysis; wearable sensors; biomechanics; smartphone



Citation: Fercho, J.; Krakowiak, M.; Yuser, R.; Szmuda, T.; Zieliński, P.; Szarek, D.; Miękiński, G. Kinematic Analysis of the Forward Head Posture Associated with Smartphone Use. *Symmetry* **2023**, *15*, 667. <https://doi.org/10.3390/sym15030667>

Academic Editors: Sergei D. Odintsov, Jeng-Shyang Pan, John H. Graham and Jan Awrejcewicz

Received: 20 November 2022

Revised: 28 February 2023

Accepted: 3 March 2023

Published: 7 March 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Musculoskeletal disorders (MSDs) are the leading cause of work absenteeism and loss of productivity across the member states of the European Union [1]. Work-related MSDs comprise a large proportion of that category. The most commonly reported biomechanical risk factors include, among others, undue repetitions and awkward postures [2]. In the past several years, numerous studies have reported a positive correlation between musculoskeletal pain and smartphone use [3–7]. The current daily usage of handheld devices by adolescents is estimated to be 5–7 h [8], which has led to a growing concern about the screen time’s impact on the stress applied to the neck and cervical spine. While children and adolescents are significant users of handheld devices, they lack awareness of the potential long-term dangers of poor posture. Recent clinical research has shown that children and adolescents with persistent musculoskeletal pain are at risk of chronic pain in adulthood [9–11]. With neck pain ranked as the 8th health condition for most years lived with disability in 15- to 19-year-olds, neck pain surpasses any other well-known adolescent health problem such as substance abuse, road accidents, and asthma [12]. A relatively new condition called text neck syndrome refers to the onset of cervical spine degeneration due to the long-term use of mobile devices with poor posture [13]. Clinical symptoms of

text neck syndrome range from musculoskeletal pain to neurological damage affecting the eyes, lungs, and heart. Despite the syndrome's symptoms, the mechanism of cervical degeneration has not been proven, and only a few studies have identified its significant correlation with smartphone use [14,15].

This study aims to identify the cervical spine region with the maximum flexion during smartphone use by using 9-axis inertial measuring units (IMUs). In addition, we looked at the head and neck symmetry, which may play a role in developing the neck–shoulder pain, as suggested in an article by Xie et al. [16]. This was accomplished by analyzing the head rotation over time (γ —Figure 1) during the use of a smartphone. The findings from this study can provide a more precise biomechanical understanding of the effect of smartphone use on the cervical spine, which is essential for future studies investigating the stress experienced by the neck's components, emphasizing the cervical spine's symmetry.

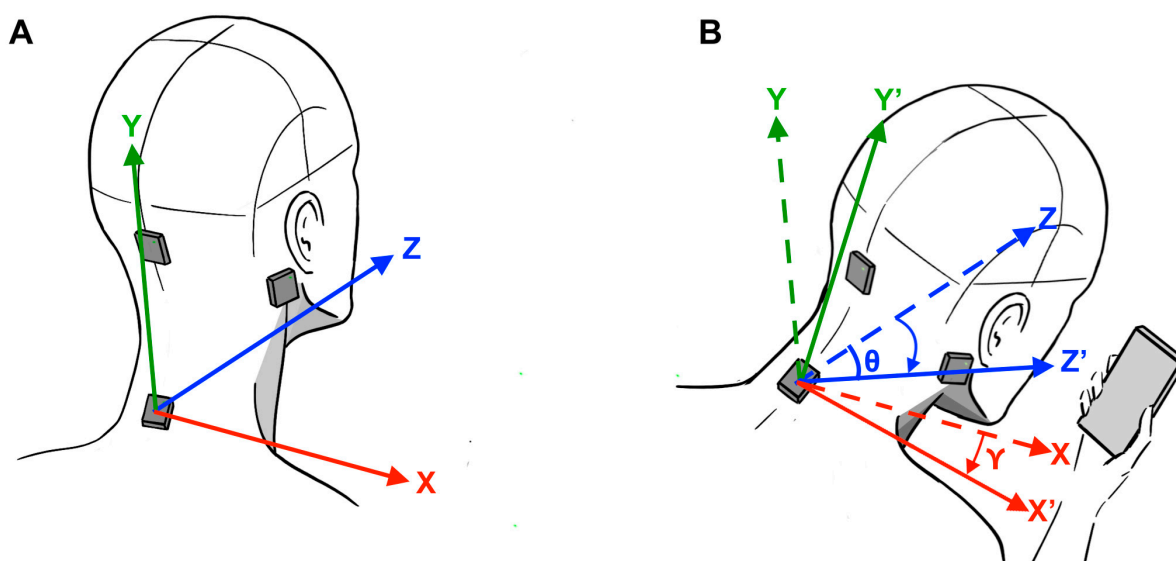


Figure 1. Euler vectors used in measurements. (A) neutral position, (B) posture during smartphone use. Θ —head/neck flexion; γ —head/neck rotation.

2. Materials and Methods

2.1. Inclusion Criteria

This study included 25 subjects (11 women and 15 men) from the Medical University of Gdansk. There were 21 medical students and 4 neurosurgical residents. The mean age was 23.36 (SD 2.79). The subjects selected to participate in the study had to have no history of spine disease or spinal injury, or have undergone spinal surgery. Issues must also have no ongoing spinal pain, neurological defects, or symptoms showing a pathological process in the spine. All requirements were carefully read, and written consent was given by each participant prior to the measurements. The study was approved by the local ethics committee at the Medical University of Gdansk (NKBBN/145/2021) and complied with the Declaration of Helsinki.

2.2. Apparatus and Sensor Attachment Points

The MetaMotionR (MMR—MbientLab, San Francisco, CA, USA), a 9-axis IMU, was used in this study. This unit consisted of a 6-axis accelerometer + gyroscope and a 3-axis magnetometer for a real-time 9-axis sensor fusion. Using the MMR and a mobile application receiving the IMU data has been previously proven to be reliable in measuring spine flexion/extension [14,17]. To calibrate the measurements, Physics Toolbox Sensor Suite Pro application version 1.9.1 (MbientLab) was installed on the observer's smartphone and connected with tcorrehe IMUs via Bluetooth (Figure 2). The sampling frequency in the application was set to 100 Hz. A total of 4 IMUs were used, each firmly attached with tape

over one of the following 4 locations: the skin overlying the external occipital protuberance, below the right mastoid process, just below the C7 spinous process, and the posterior aspect of the participant's smartphone. The 3 IMUs superficially attached to the patient allowed flexion analysis of the spine to be divided into three parts: the atlanto-occipital joint (C0–C1), C2–C7 vertebral levels, and torso. The IMU was also attached to the smartphone to calculate the screen's absolute inclination.

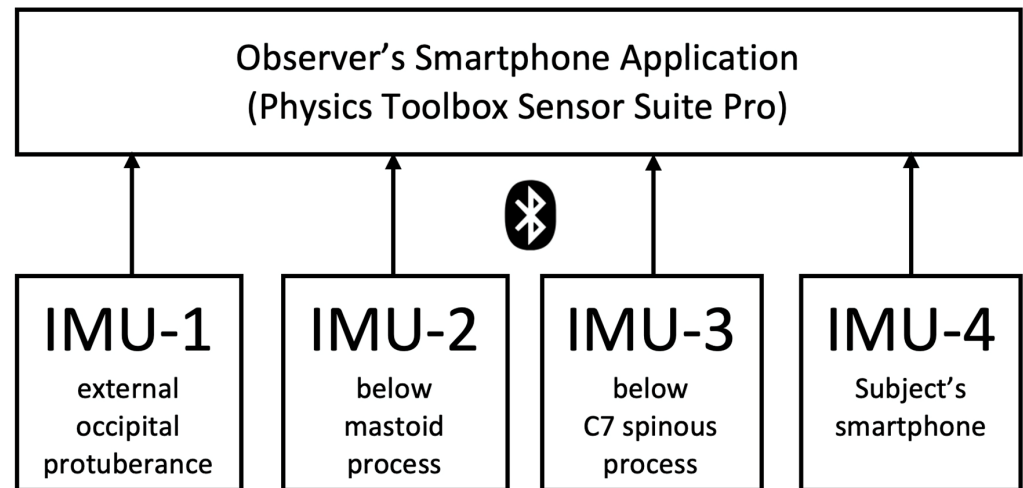


Figure 2. Sensor setup.

2.3. Tasks and Measurements

Patients were analyzed in three postures: sitting, standing, and walking. Four measurements were taken. The first measurement (M1) was a calibration phase that measured the subjects seated in a chair without their legs crossed and looking straight forward for 5 min. M1 was a neutral zero position as it required minimal energy expenditure, and it is when the head, neck, and torso are aligned with the rest of the spine. The data from the IMUs during M1 were implemented into all the following measurements as the reference coordinate.

The second measurement (M2) required the subjects to text on the smartphone with one hand, measured for 5 min. When the subjects were asked to perform M2, the forward flexion angles produced by C0–C1, C2–C7 vertebral levels, and torso were evaluated with respect to the one stored in the calibration phase from M1. The third measurement (M3) required the subjects to stand for 15 s while using their smartphone in one hand. The fourth measurement (M4) required the subject to walk 10 m at their own pace while texting with one hand. As explained, the forward flexion vectors would be evaluated with respect to the one from the calibration phase (M1). M2, M3, and M4, which involved smartphone use, required the subjects to always maintain eye contact with their phone. During all 4 measurements, the subjects were advised not to speak or make any unasked movements. Subjects were allowed to use their smartphones throughout the duration of M2, M3, and M4.

2.4. Segment Angle Calculation

Data from each IMU were used to calculate the flexion of cervical divided into two segments: craniocervical junction (C0–C1) and subaxial (C2–C7). Due to the limited movement of the thoracic spine, the torso was used as the base reference. The IMU attached at the C7 spinous process (IMU-3) provides the data on torso flexion, expressed as the absolute angle obtained from the calibrated Euler vector. Similar studies analyzing movement in this region have also used a single IMU, and attaching the device to the chest or upper back is all shown to be effective [18–20]. The IMU attached below the mastoid process (IMU-2) was treated as the uppermost point of the C2–C7 vertebral levels

(approximately at the C1 vertebral level). Its placement simultaneously is unaffected by head flexion. Data from the IMU-2 and IMU-3 were used to measure the flexion of the C2–C7 vertebral levels and were calculated by the following formula:

$$\theta_{\text{C2-C7 vertebral levels}} = (\beta - \alpha)$$

where θ_{subaxial} is the degree of the flexion of the C2–C7 vertebral levels, β is the change in pitch detected by IMU-2, and α is the change in pitch detected by IMU-3. The data from the IMU attached to the external occipital protuberance (IMU-1) along with IMU-2 were used to calculate the C0–C1 joint flexion.

By subtracting the pitch detected by γ (IMU-1) from β , θ_{head} (flexion of the C0–C1 joint) was provided.

$$\theta_{\text{head}} = (\gamma - \beta)$$

2.5. Symmetry Analysis

For symmetry analysis, the yaw value was used (γ —Figure 1). The use of data merge from multiple sensors within each IMU provided the absolute azimuth (heading) for each device. This value was recorded per IMU during the M1 (calibration—a neutral value) and M2 tasks. The resulting head yaw was calculated by subtracting the heading of IMU-1 from the respective value of IMU-3.

3. Results

The C0–C1 joint was the largest contributor in forward flexion out of the two segments analyzed from the cervical parameters. When analyzing the mean flexion angles during sitting and walking, the C0–C1 joint was the only contributor to flexion among the cervical parameters as only extension (indicated by a positive value in Figure 3) was measured at the C2–C7 vertebral levels. During sitting, an average change in $-33.33 \pm 13.56^\circ$ was measured by the C0–C1 joint, and an average change in $3.30 \pm 10.10^\circ$ was measured by the C2–C7 vertebral levels. During standing, an average change in $-27.50 \pm 14.05^\circ$ was measured by the C0–C1 joint and an average change in $-2.50 \pm 9.99^\circ$ by the C2–C7 vertebral levels. During walking, an average change in $-32.03 \pm 18.35^\circ$ was measured at the C0–C1 joint and an average change in $3.30 \pm 10.10^\circ$ at the C2–C7 vertebral levels. The mean flexion of the overall cervical parameters was similar with all tasks: during walking, which was approximately 5.82° greater than standing ($p < 0.05$) and approximately 2.76° greater than sitting.

Comparing the flexion angles for each task, statistically significant differences were present when comparing the angle of the C0–C1 joint to the C2–C7 vertebral levels and the torso ($p < 0.0001$). Additionally, one-way ANOVA confirmed a significant difference in the position of the smartphone during each of the three tasks ($p < 0.005$). Despite changes in the position of the smartphone during each measurement, the head position remained balanced. On the other hand, the flexion of the C0–C1 joint was far greater than that of the C2–C7 vertebral levels and torso in each task performed ($p < 0.001$).

With regard to the symmetry, a distinctive pattern of head movement was noted in 20 out of 25 subjects during the M2 task. Namely, there was a sawtooth yaw movement over the course of the measurement period, with noticeable slow and fast phases (Figure 4). The slow phase was counterclockwise (left) in all except one subject. The mean amplitude of oscillations was 19.77° (range 15.58 – 28.13); the mean frequency was 12.57 mHz (range 4.03 – 35.44). The correlation of frequency with the amount of neck flexion as evaluated with the Spearman coefficient was statistically significant at $p < 0.001$. There was no correlation between the amplitude and neck flexion. For the control M1 task, only low-amplitude random fluctuations were noted (Figure 4).

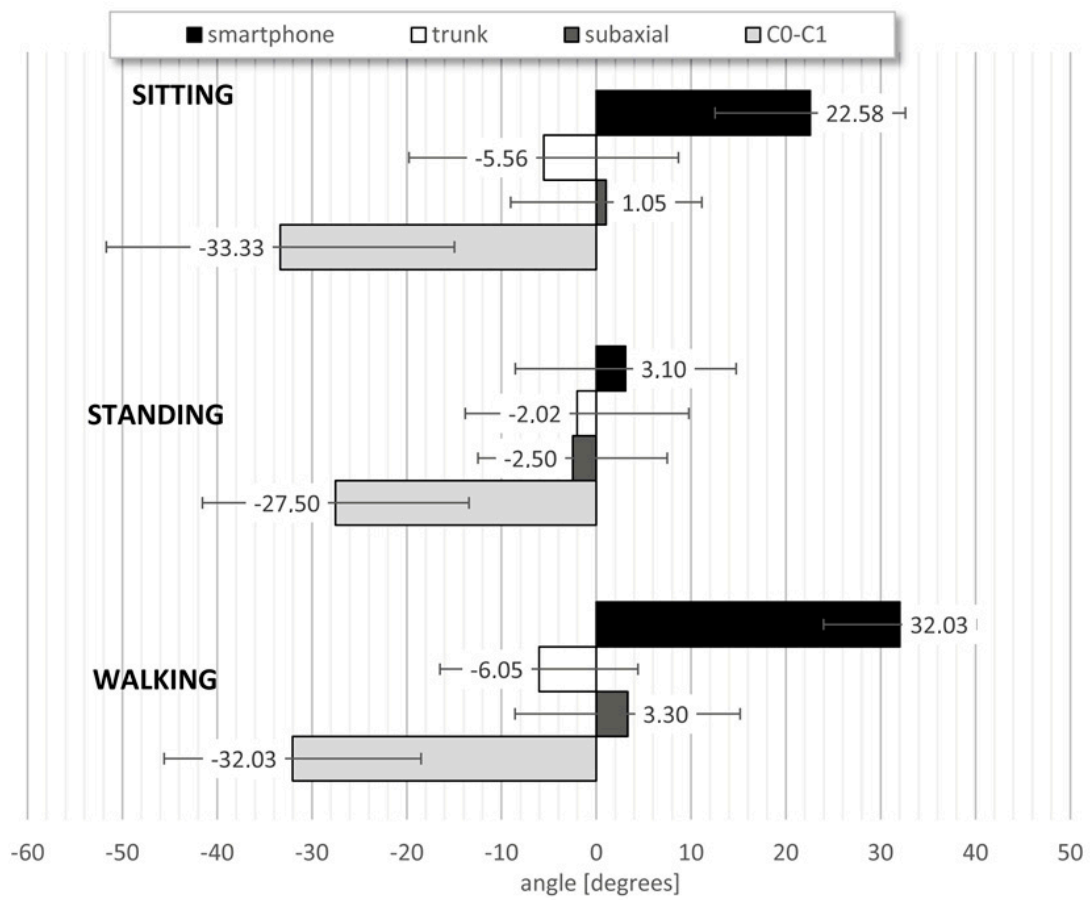


Figure 3. Changes in flexion at three segments of the spine and inclination of smartphone screen during three tasks.

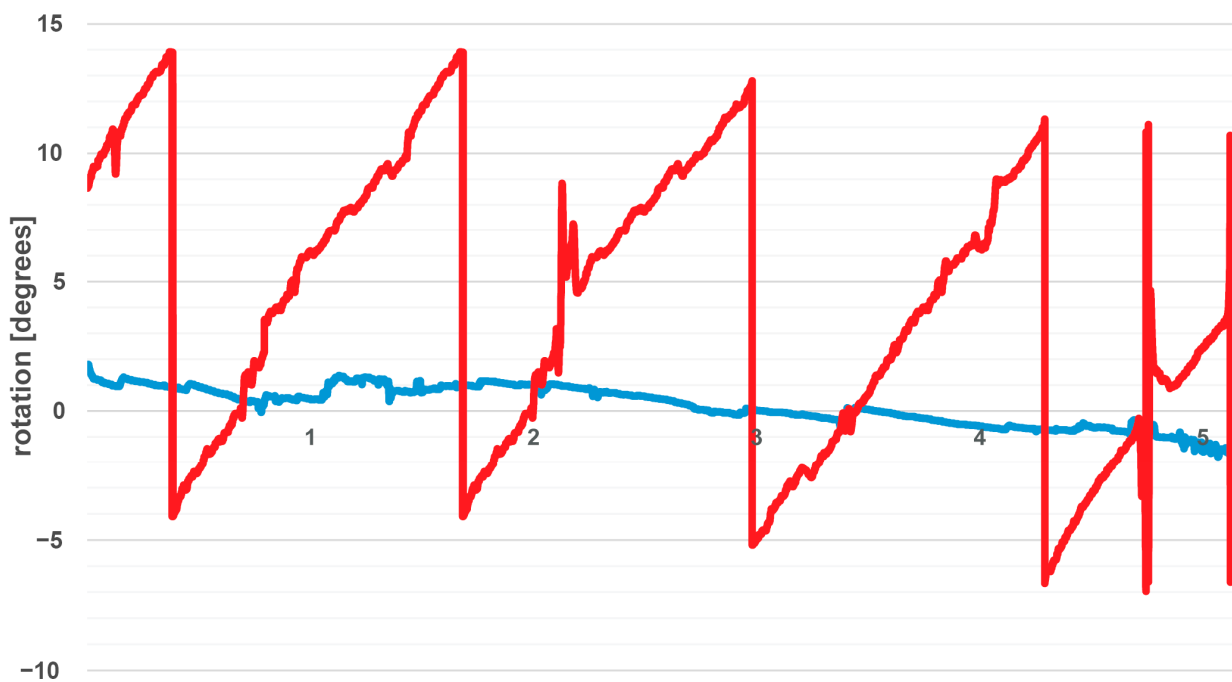


Figure 4. Raw data of head rotation during 5 min of texting (red line) and in neutral pose recorded for 5 min (blue line).

4. Discussion

The term “text neck” describes a repetitive stress injury caused by the prone posture associated with the overuse of smartphones for prolonged periods [21]. It has been shown that it leads to accelerated degeneration of the cervical spine in children and adolescents [7]. An inadequate posture equally affects all components of the cervical spine: intervertebral discs [14], uncovertebral joints [22], and ligaments [23]. An often-quoted hypothesis is based on the observation that the neck flexes forward during smartphone use, with the fulcrum of movement in adult at the C5/6 level [24].

This study was designed to look into the biomechanics of text neck syndrome, emphasizing the role of craniocervical junctions vs. subaxial levels. It identified the C0–C1 joint as the major contributor in forward flexion during smartphone use during sitting, standing, and walking. The C2–C7 vertebral levels remained almost stationary. The main compensatory movement to counter the center of gravity shift caused by the significant flexion angle at the C0–C1 joint was at the torso level.

This study’s findings also question a reference heavily cited when supporting theories on the negative long-term effect of smartphone use on the cervical spine and text neck syndrome. A frequently referenced study by Hansraj et al. [8] calculated the combined force exerted onto the neck’s muscles, ligaments, and tendons at various flexion angles. The study incorporated realistic values of the head and neck into a simulation program while using the C7 vertebra as the lowest point of measurement. At neutral position when no flexion was present, the estimated weight experienced by the neck was 5 kg [8]. At 30° flexion, the force drastically increased to 18 kg, 22 kg at 45°, and 27 kg at 60°. Although the simulated results using the values inputted are likely to be accurate, the findings from our study suggest that many of the forces reported by Hansraj et al. are most likely not caused by the altered natural posture of the spine but rather the result of the shift in gravity point. Due to the C0–C1 joint being the most superior flexional point in the human body and simultaneously contributing to nearly the entire flexion movement, the flexion angle when measuring from the C7 vertebra is unlikely to be extreme. The findings from a recent study by Kim et al. would support this theory as the study assessed lumbar, thoracic, and cervical flexion during smartphone use while sitting and standing [25]. While treating the cervical parameters as a single joint segment, the mean cervical flexion while sitting was measured to be only 22.06° and 28.25° while standing. Given that the mean flexion angles identified by Kim et al. and our study range only around 20°–30° when performing the common tasks involving smartphone use, we encourage readers when interpreting the findings from Hansraj et al. to bear in mind that the extreme angles reported such as 45° and 60° are most likely not experienced by an average individual.

This study was largely inspired by the concept of the cone of economy introduced by Dubousset in 1994 [26]. The cone of economy (CoE) refers to a cone-like region beginning at the feet and extending upward surrounding an individual. It was originally created to assess patients with spinal deformity at the lumbopelvic region. The ability for an individual to remain inside the cone is vital in the long term to keep energy expenditure at a minimum by allowing the line of gravity to fall within the base of support [27,28]. Spine disorders or poor posture, in general, displaces the line of gravity outside the base of the cone and thus requires excessive muscle training [29]. Prolonged posture identified outside the cone will result in muscular pain and a possible alteration of the biomechanical property of the spine. In theory, it is feasible to create a “safety envelope” for neck displacement parameters encountered during prolonged postural strain, as with the text neck. Such set of rules has already been proposed as neck injury criteria by The National Highway Transportation Safety Administration (NHTSA) called the N_{ij} [30]. It was introduced as a part of a comprehensive crash protection safety standard used in the assessment of advanced automotive restraint systems [31].

The cervical kyphosis thought to be observed during smartphone use can be hypothesized to potentially displace the gravity line outside the ideal region. However, from our findings, the head flexion observed is almost entirely based on the C0–C1 rotation. Despite

the extensor muscles of the neck being largely targeted, which is most likely the cause of the reported musculoskeletal pain, the head's center of gravity is located near the sella turcica [32]. Therefore, the sagittal profile of the cervical spine would remain unaffected and, arguably, would not contribute to the degeneration of the cervical spine. Our results do not negate the detrimental effect of smartphone use on the health of the C2–C7 vertebral levels. They merely show that, if present, it is rather secondary to the posterior tension band wear and tear.

Another factor that may play an important role in developing neck and arm pain related to smartphone use is the posture symmetry. It has been shown that smartphone users who perform texting with one hand (“unilateral texting”) are more likely to develop neck–shoulder pain than those who use both hands (“bilateral texting”) [16,33]. In this study, subjects were performing unilateral texting. Our study's secondary goal was assessing the role of head rotation in developing pain. Initial analysis failed to demonstrate any relationship; however, with the extended recording of the head position, a sawtooth pattern became apparent. One plausible explanation of this finding is that the slow phase represents an involuntary head movement toward a more favorable symmetrical configuration. Without a doubt, periodic head oscillations require additional muscle work, and they not only consume additional energy but also may contribute to the neck pain.

In recent years, the technology behind IMU sensors greatly improved. Among the advances, the incorporation of the sensor fusion technology at a reasonable price was a breakthrough as it allowed for a precise measurement of the absolute angular position in any given plane. Their miniaturization and capable wireless data transfer have resulted in their use in many recent biomechanical studies, including several spine-related studies [19,34–37].

5. Study Limitations

This study was conducted in an experimental environment to reduce the possibility of confounding variables. Despite the tasks performed by the subjects being derived from every-day behaviors, the subjects may have differently performed in their natural setting when not under any observation. Additionally, we assumed the postural stability of the thoracic spine to be maintained during all tasks given its ridged anatomical structure. Therefore, it is safe to assume that no significant flexion or extension by the thoracic spine was present during the sitting and standing phase, which could affect our data. However, regarding walking, it is less obvious and requires a validation study on the matter. Therefore, our results regarding the walking phase should be interpreted with caution. The data obtained from the sitting position may also be less reliable. We understand that the chair used by an individual will heavily determine the spine flexion angles. Therefore, individuals among a population that use non-ergonomic chairs, especially those without back support, would not apply to the findings of this study. It is also important to mention that the IMU attachment points are all superficial, and, therefore, their data monitoring of the bony landmarks is not exactly accurate. However, multiple recent studies have assessed this limitation with IMUs by comparing with conventional methods for joint movement analysis (commonly with the Vicon Motion Capture System) and confirmed that performance differences were not significant [17,35,38]. Last but not least, the present study would benefit from surface EMG recording, especially with regard to an increased work exerted by neck muscles during head oscillations.

6. Conclusions

This study identified the region of greatest contribution toward forward flexion along the cervical parameters during various tasks involving smartphone use. Though the value in the degrees of flexion of the C0–C1 joint and C2–C7 vertebral levels did not greatly differ between the different tasks performed by the subjects, the differences were still significant. On the other hand, the tilt angle of the smartphone significantly varied during each of the three tasks. With unilateral texting, the head slowly rotates toward

symmetric configuration with corrective fast phase. The correlation between the frequency and amount of neck flexion as evaluated with the Spearman coefficient was statistically significant. Future studies should focus on how this pattern affects the cervical spine's complex biomechanics. To strengthen the overall findings of this study, we encourage studies to test other common movements and tasks that were not covered. By improving the generalizability and consistency of the current findings on the biomechanics behind smartphone use, the steps in reaching public awareness on the potential long-term hazards of poor posture are heading toward the right direction.

Author Contributions: Conceptualization, J.F., R.Y. and G.M.; methodology, G.M.; software, R.Y.; validation, M.K. and T.S.; formal analysis, D.S.; investigation, J.F. and M.K.; resources, D.S.; data curation, T.S.; writing—original draft preparation, J.F.; writing—review and editing, J.F. and G.M.; visualization, R.Y.; supervision, P.Z. and G.M.; project administration, G.M. and P.Z.; funding acquisition, J.F. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Bevan, S. Economic Impact of Musculoskeletal Disorders (MSDs) on Work in Europe. *Best Pract. Res. Clin. Rheumatol.* **2015**, *29*, 356–373. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. da Costa, B.R.; Vieira, E.R. Risk Factors for Work-Related Musculoskeletal Disorders: A Systematic Review of Recent Longitudinal Studies. *Am. J. Ind. Med.* **2010**, *53*, 285–323. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
3. Derakhshanrad, N.; Yekaninejad, M.S.; Mehrdad, R.; Saberi, H. Neck Pain Associated with Smartphone Overuse: Cross-Sectional Report of a Cohort Study among Office Workers. *Eur. Spine J.* **2021**, *30*, 461–467. [[CrossRef](#)]
4. Al-Hadidi, F.; Bsisu, I.; AlRyalat, S.A.; Al-Zu'bi, B.; Bsisu, R.; Hamdan, M.; Kanaan, T.; Yasin, M.; Samarah, O. Association between Mobile Phone Use and Neck Pain in University Students: A Cross-Sectional Study Using Numeric Rating Scale for Evaluation of Neck Pain. *PLoS ONE* **2019**, *14*, e0217231. [[CrossRef](#)]
5. Alsalameh, A.M.; Harisi, M.J.; Alduayji, M.A.; Almutham, A.A.; Mahmood, F.M. Evaluating the Relationship between Smartphone Addiction/Overuse and Musculoskeletal Pain among Medical Students at Qassim University. *J. Fam. Med. Prim. Care* **2019**, *8*, 2953. [[CrossRef](#)]
6. Mustafaoglu, R.; Yasaci, Z.; Zirek, E.; Griffiths, M.D.; Ozdinciler, A.R. The Relationship between Smartphone Addiction and Musculoskeletal Pain Prevalence among Young Population: A Cross-Sectional Study. *Korean J. Pain* **2021**, *34*, 72. [[CrossRef](#)]
7. Fares, J.; Fares, M.Y.; Fares, Y. Musculoskeletal Neck Pain in Children and Adolescents: Risk Factors and Complications. *Surg. Neurol. Int.* **2017**, *8*, 72. [[CrossRef](#)]
8. Hansraj, K.K. Assessment of Stresses in the Cervical Spine Caused by Posture and Position of the Head. *Surg. Technol. Int.* **2014**, *25*, 277–279.
9. Jones, G.T.; Silman, A.J.; Power, C.; Macfarlane, G.J. Are Common Symptoms in Childhood Associated with Chronic Widespread Body Pain in Adulthood? Results from the 1958 British Birth Cohort Study. *Arthritis Rheum.* **2007**, *56*, 1669–1675. [[CrossRef](#)]
10. Brattberg, G. Do Pain Problems in Young School Children Persist into Early Adulthood? A 13-Year Follow-Up. *Eur. J. Pain* **2004**, *8*, 187–199. [[CrossRef](#)]
11. Hestbaek, L.; Leboeuf-Yde, C.; Kyvik, K.O.; Manniche, C. The Course of Low Back Pain from Adolescence to Adulthood: Eight-Year Follow-up of 9600 Twins. *Spine* **2006**, *31*, 468–472. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
12. GBD Compare | IHME Viz Hub. Available online: <https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/> (accessed on 21 July 2021).
13. David, D.; Giannini, C.; Chiarelli, F.; Mohn, A. Text Neck Syndrome in Children and Adolescents. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2021**, *18*, 1565. [[CrossRef](#)]
14. Zhuang, L.; Wang, L.; Xu, D.; Wang, Z.; Liang, R. Association between Excessive Smartphone Use and Cervical Disc Degeneration in Young Patients Suffering from Chronic Neck Pain. *J. Orthop. Sci.* **2021**, *26*, 110–115. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
15. Çevik, S.; Kaplan, A.; Katar, S. Correlation of Cervical Spinal Degeneration with Rise in Smartphone Usage Time in Young Adults. *Niger. J. Clin. Pract.* **2020**, *23*, 1748–1752. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Xie, Y.F.; Szeto, G.; Madeleine, P.; Tsang, S. Spinal Kinematics during Smartphone Texting—A Comparison between Young Adults with and without Chronic Neck-Shoulder Pain. *Appl. Ergon.* **2018**, *68*, 160–168. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
17. Beange, K.H.E.; Chan, A.D.C.; Beaudette, S.M.; Graham, R.B. Concurrent Validity of a Wearable IMU for Objective Assessments of Functional Movement Quality and Control of the Lumbar Spine. *J. Biomech.* **2019**, *97*, 109356. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
18. Vignais, N.; Miezal, M.; Bleser, G.; Mura, K.; Gorecky, D.; Marin, F. Innovative System for Real-Time Ergonomic Feedback in Industrial Manufacturing. *Appl. Ergon.* **2013**, *44*, 566–574. [[CrossRef](#)]

19. Yan, X.; Li, H.; Li, A.R.; Zhang, H. Wearable IMU-Based Real-Time Motion Warning System for Construction Workers' Musculoskeletal Disorders Prevention. *Autom. Constr.* **2017**, *74*, 2–11. [[CrossRef](#)]
20. Huang, C.; Kim, W.; Zhang, Y.; Xiong, S. Development and Validation of a Wearable Inertial Sensors-Based Automated System for Assessing Work-Related Musculoskeletal Disorders in the Workspace. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2020**, *17*, 6050. [[CrossRef](#)]
21. Neupane, S.; Ali, U.; Mathew, A. Text Neck Syndrome—Systematic Review. *Imp. J. Interdiscip. Res.* **2017**, *3*, 141–148.
22. Barrett, J.M.; McKinnon, C.; Callaghan, J.P. Cervical Spine Joint Loading with Neck Flexion. *Ergonomics* **2019**, *63*, 101–108. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
23. AlAbdulwahab, S.S.; Kachanathu, S.J.; AlMotairi, M.S. Smartphone Use Addiction Can Cause Neck Disability. *Musculoskelet. Care* **2017**, *15*, 10–12. [[CrossRef](#)]
24. Chu, E.C.-P.; Wong, A.Y.-L. Cervicogenic Dizziness in an 11-Year-Old Girl: A Case Report. *Adolesc. Health Med. Ther.* **2021**, *12*, 111–116. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. Kim, H.K.; Kim, N.; Park, J. Relationship Analysis between Body Flexion Angles and Smartphone Tilt during Smartphone Use. *Int. J. Ind. Ergon.* **2020**, *80*, 103034. [[CrossRef](#)]
26. Dubousset, J. Three-Dimensional Analysis of the Scoliotic Deformity. In *The Pediatric Spine: Principles and Practice*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1994.
27. Haddas, R.; Lieberman, I.; Boah, A.; Arakal, R.; Belanger, T.; Ju, K.L. Functional Balance Testing in Cervical Spondylotic Myelopathy Patients. *Spine* **2019**, *44*, 103–109. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
28. Haddas, R.; Lieberman, I.H. A Method to Quantify the “Cone of Economy”. *Eur. Spine J.* **2018**, *27*, 1178–1187. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
29. Iyer, S.; Sheha, E.; Fu, M.C.; Varghese, J.; Cunningham, M.E.; Albert, T.J.; Schwab, F.J.; Lafage, V.C.; Kim, H.J. Sagittal Spinal Alignment in Adult Spinal Deformity: An Overview of Current Concepts and a Critical Analysis Review. *JBJS Rev.* **2018**, *6*, e2. [[CrossRef](#)]
30. Parr, M.J.C.; Miller, M.E.; Bridges, N.R.; Buhrman, J.R.; Perry, C.E.; Wright, N.L. Evaluation of the Nij Neck Injury Criteria with Human Response Data for Use in Future Research on Helmet Mounted Display Mass Properties. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.* **2012**, *56*, 2070–2074. [[CrossRef](#)]
31. Prasad, P.; Mertz, H.J.; Dalmotas, D.J.; Augenstein, J.S.; Digges, K. Evaluation of the Field Relevance of Several Injury Risk Functions. *Stapp Car Crash J.* **2010**, *54*, 49. [[CrossRef](#)]
32. Vital, J.M.; Senegas, J. Anatomical Bases of the Study of the Constraints to Which the Cervical Spine Is Subject in the Sagittal Plane A Study of the Center of Gravity of the Head. *Surg. Radiol. Anat.* **1986**, *8*, 169–173. [[CrossRef](#)]
33. Xie, Y.; Szeto, G.P.Y.; Dai, J.; Madeleine, P. A Comparison of Muscle Activity in Using Touchscreen Smartphone among Young People with and without Chronic Neck–Shoulder Pain. *Ergonomics* **2015**, *59*, 61–72. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. Carbonaro, N.; Mascherini, G.; Bartolini, I.; Ringressi, M.N.; Taddei, A.; Tognetti, A.; Vanello, N. A Wearable Sensor-Based Platform for Surgeon Posture Monitoring: A Tool to Prevent Musculoskeletal Disorders. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2021**, *18*, 3734. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
35. Franco, L.; Sengupta, R.; Wade, L.; Cazzola, D. A Novel IMU-Based Clinical Assessment Protocol for Axial Spondyloarthritis: A Protocol Validation Study. *PeerJ* **2021**, *9*, e10623. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
36. Zhang, Y.; Haghighi, P.D.; Burstein, F.; Yap, L.W.; Cheng, W.; Yao, L.; Cicuttini, F. Electronic Skin Wearable Sensors for Detecting Lumbar–Pelvic Movements. *Sensors* **2020**, *20*, 1510. [[CrossRef](#)]
37. Shin, S.S.; Yoo, W. gyu Inertial Measurement Unit-Based Evaluation of Global and Regional Lumbar Spine and Pelvis Alignment in Standing Individuals with a Flat Lumbar Posture. *J. Manip. Physiol. Ther.* **2019**, *42*, 594–600. [[CrossRef](#)]
38. Aranda-Valera, I.C.; Cuesta-Vargas, A.; Garrido-Castro, J.L.; Gardiner, P.V.; López-Medina, C.; Machado, P.M.; Condell, J.; Connolly, J.; Williams, J.M.; Muñoz-Esquivel, K.; et al. Measuring Spinal Mobility Using an Inertial Measurement Unit System: A Validation Study in Axial Spondyloarthritis. *Diagnostics* **2020**, *10*, 426. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Article

The Symmetry of Lower Back Pain as a Potential Screening Factor for Serious Pathology: A Survey Study

Grzegorz Miękiśiak ^{1,2,*}, Rafał Załuski ³, Dariusz Szarek ², Samuel D. Pettersson ⁴, Justyna Fercho ⁵, Adam Druszczyk ⁶ and Celina Pezowicz ⁷

¹ Institute of Medicine, University of Opole, 45-052 Opole, Poland

² Department of Neurosurgery, Marciniak's Hospital, 54-049 Wrocław, Poland; d.szarek@szpital-marciniak.wroclaw.pl

³ Department of Neurosurgery, Wrocław Medical University, 50-532 Wrocław, Poland; rafal.zaluski@umw-edu.pl

⁴ Scientific Circle of Neurology and Neurosurgery, Neurosurgery Department, Medical University of Gdansk, 80-210 Gdańsk, Poland; samueldpettersson@gumed.edu.pl

⁵ Department of Neurosurgery, Medical University of Gdansk, 80-210 Gdańsk, Poland; jfercho@uck.gda.pl

⁶ Provincial Specialist Hospital in Legnica, Department of Neurosurgery, 59-220 Legnica, Poland; adam.druszczyk@umw-edu.pl

⁷ Department of Mechanics, Materials and Biomedical Engineering, Wrocław University of Science and Technology, 50-371 Wrocław, Poland; celina.pezowicz@pwr.edu.pl

* Correspondence: grzegorz.miekisiak@uni.opole.pl; Tel.: +48-71-306-4607



Citation: Miękiśiak, G.; Załuski, R.; Szarek, D.; Pettersson, S.D.; Fercho, J.; Druszczyk, A.; Pezowicz, C. The Symmetry of Lower Back Pain as a Potential Screening Factor for Serious Pathology: A Survey Study. *Symmetry* **2021**, *13*, 1994. <https://doi.org/10.3390/sym13111994>

Academic Editors: Sergei D. Odintsov and Janos Mink

Received: 25 August 2021

Accepted: 14 October 2021

Published: 21 October 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Background: Pain maps provide reliable information on pain location in various conditions. This study explored the feasibility of pain maps as a screening tools for serious underlying conditions. The pain symmetry was evaluated as the possible distinguishing feature. Methods: A Web-based survey on the correlation of pain-related disability and pain pattern was developed. Respondents with lower back pain were asked to mark the exact location of their pain over the pain chart. The symmetry index was calculated and used to divide subjects into two groups that were then compared in terms of the prevalence of red flags for serious pathologies, as well as the pain-related disability measured with COMI and ODI instruments. Results: Of the 4213 respondents who completed the survey, 1018 were included in the study. The pain related disability was greater in respondents with asymmetrical pain patterns, as shown with all instruments. The distribution of red flags was also dependent on pain symmetry. The history of weight loss (6.70 vs. 1.76 $p < 0.001$) and fever (4.91 vs. 2.14 $p < 0.001$) were more prevalent with symmetrical pain patterns, and the history of trauma was more frequent with asymmetrical pain (21.41 vs. 10.71 $p < 0.001$). Conclusions: It was shown that the symmetry of pain is correlated to the prevalence of red flags and pain-related disability.

Keywords: low back pain; red flags; web survey; disability

Lower back pain (LBP) is a complex condition involving the bones, muscles, and nerves near the lumbosacral segment of the spine. It is one of the leading causes of disability throughout the world [1,2], with an annual incidence ranging from 1.5–36% of the general population [3]. Despite its prevalence, this entity remains a clinical conundrum. This highly ambiguous symptom can be a presentation of various underlying conditions that require vastly different approaches. In most cases, the cause is benign and requires rather minimalistic management. In other cases, it is caused by a serious pathology where a quick and accurate diagnosis is of critical importance. An essential problem in daily practice is how to screen patients to determine their eligibility for further investigation. Virtually all modern guidelines include the recommendation that the initial clinical evaluation should focus on the identification of red flags (RFs) to screen for specific diseases such as cancer, infection, and vertebral fracture [4]. Although RFs are often criticized for high false-positive rates, especially in the detection of malignancies and vertebral fractures [5,6], their negative

predictive value is as high as 99% [7]. Thus, it is very unlikely to miss serious pathologies with no positive RFs. One of basic characteristics is pain location, which can, to a certain extent, predict the source [7]. The principal method of obtaining information on the exact pain location is through pain maps (PMs). It has been proven that assessing the pain distribution by using pain drawings is a clinically relevant and reliable method [8–10]. In the past several years, with the development of new mobile technologies, this method has gained a new interest from investigators. Starting as an effective, yet simple pen-on-paper tool, pain maps are now advanced digital health applications paving the way for new avenues of basic translational and clinical applications [11]. A key advantage of the electronic pain map is the much-needed ability to analyze results right upon completion of the drawings, without the need for labor-intensive digitization [12]. This can be further enhanced with data mining and machine learning approaches [11] in order to enable the instantaneous evaluation of even very large datasets.

In this study, LBP patterns were analyzed regarding pain symmetry. The entire population studied was divided into two groups: highly symmetrical and asymmetrical pain patterns. The main aim was to compare the prevalence of RFs between groups. The secondary goal was to assess the pain-related disability in each group. The pain map with relevant patient-reported disability measures was launched as an open Web-based survey embedded within a thematic portal.

1. Methods

1.1. Web Questionnaire

A Web-based survey on the correlation of pain-related disability and pain patterns was developed. It was an open-access survey nested within a thematic Web portal. The survey was developed as a rich Internet application using JavaScript technology on the client side and PHP scripting on the server side. The forms were interactive, self-validating providing relevant feedback data based on selected options. Users were able to review their answers at the end of the survey, prior to final submission. The usability and technical functionality were thoroughly tested before implementing the final version. The questionnaire was divided into the following four steps: the first contained information on basic demographics and the duration of symptoms (five questions), the latter was divided into four categories: less than 7 days, 7 days–4 weeks, 4 weeks–3 months, and more than 3 months. This was followed by the subsequent steps, namely: the Oswestry Disability Questionnaire (ODI) (10 items), the Core Outcome Measures Index (COMI) (6 items), the RFs (3 items), and the digital PM. The following factors were considered to be RFs: unexplained weight loss, fever lasting >3 days, and a history of trauma. The PM was placed as the last step of the survey. It was a clickable 2D silhouette representing the entire body and could be viewed from either the front or back. Each image was a GIF file of 435×600 pixels in diameter. The images were gender specific. Users were allowed to make any number of markings.

The data used in this study were collected from 1 September 2013 until 25 June 2016. No information that could lead to the identification of respondents was recorded, including the IP addresses. For the same reason, cookies were not used. Google Analytics (Google Inc., Mountain View, CA, USA) was used to evaluate the Web traffic. The Web survey was created according to the Checklist for Reporting Results of Internet E-Surveys [13]. Institutional Review Board approval was waived as this was an observational study based on data which were entirely anonymous. Informed consent was obtained from each subject beforehand.

The Web survey was nested within a thematic Web portal dedicated for users seeking information on spinal disorders. Its content was endorsed by the Polish Society of Spinal Surgery. The subjects were conveniently recruited from the visitors of this website. The baseline criteria were as follows: a minimum age of 18 and back pain as the most troubling issue. The latter was determined based on the first question of the COMI questionnaire which read, “Which of the following problems troubles you the most?”, with the following possible answers: (a) back pain; (b) leg/buttock pain; (c) sensory disturbances in the

back/leg/buttocks, e.g., tingling, ‘pins and needles’, and numbness; or (d) none of the above. Only subjects who selected the ‘a’ answer were included in this study.

1.2. Statistical Analysis

We analyzed the symmetry regarding the midline by computing the symmetry index (SI) of pain markings, which was calculated per each subject using the formula proposed by Herzog et al. [14], with X_R and X_L as an absolute distance from the midline in points.

$$SI = \frac{X_R - X_L}{0.5(X_R + X_L)} \times 100\%$$

The sample size was calculated. Based on a previous study [15], the Cohen d was estimated to be 0.2; thus, the calculated minimum sample size was 786 in order to achieve a statistical power of 0.80.

For the purpose of this study, we selected an SI value of 20 as the threshold between the symmetrical pain group ($SPG - AI \leq 20$) and the asymmetrical pain group ($ASG - AI > 20$). The data integrity was assessed by calculating Cronbach’s alpha for the ODI.

Differences in the mean values of the continuous variables were compared with Student’s t -test. Proportions were compared with the ‘N-1’ Chi-squared test [16]. A p -value ≤ 0.05 was considered statistically significant.

2. Results

From 1 September 2013 until 25 June 2016, a total of 4213 users visited the web page containing the questionnaire. During this time, 3621 respondents completed the questionnaire. Within this group, 1418 selected ‘back pain’ as the problem troubling them the most. Out of the respondents who selected ‘back pain’, 1018 marked at least three points in the designated area (within the silhouette outlines from mid-thoracic down to the knee level). Thus, the final n of subjects included in the analysis was 1018. There were 549 females with a mean (SD) age of 42.19 (22.86) and 469 males with a mean (SD) age of 36.60 (21.20). The difference was statistically significant at $p < 0.001$. The flowchart is presented in Figure 1.

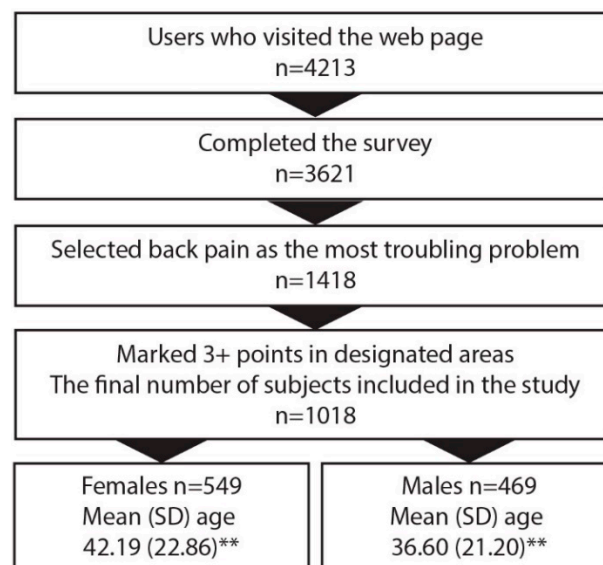


Figure 1. Flowchart of the survey. ** $p < 0.001$.

A total of 4650 points were marked. Each respondent marked a mean of 4.57 points. The averaged pain maps are shown in Figure 2. In 439 cases, the pain was symmetrical ($AI \leq 20$) (symmetrical pain group (SPG)) and in 579 cases, it was asymmetrical ($AI > 20$)

(asymmetrical pain group (APG)). The F/M ratio in the former group was 44.42/55.58 and 52.68/47.32 in the latter. The difference was not statistically significant. Respondents in the SPG group were slightly older with a mean (SD) age of 41.57 (11.64) vs. 40.57 (12.02) in the APG; however, the difference was not significant. The median duration of pain was more than 3 months, with no difference between groups.

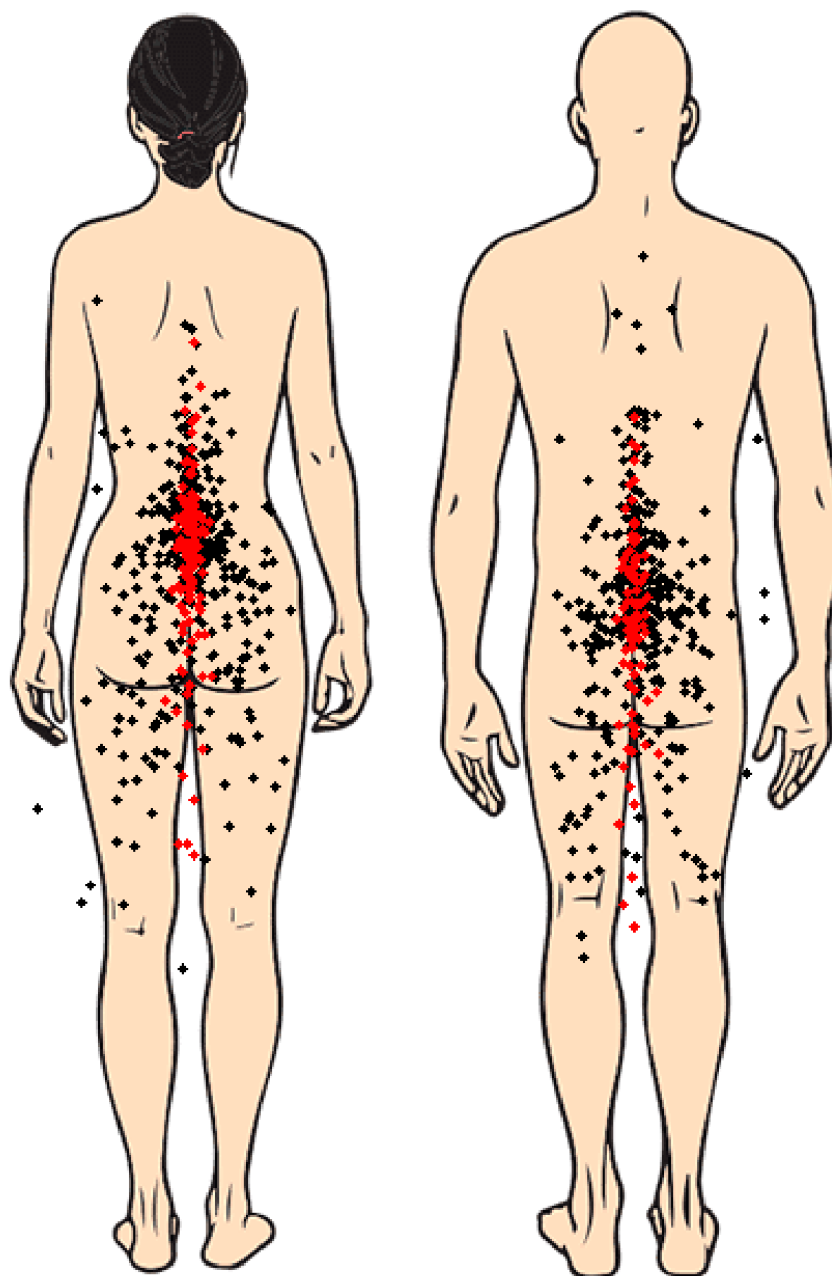


Figure 2. Pain drawings. Each point represents the mean value of each respondent in the x - and y -axes. Red dots: symmetrical group; black dots: asymmetrical group.

The pain in the APG caused a significantly greater disability than in the SPG, as measured with all instruments. All differences were statistically significant at $p < 0.001$. Details are shown in Figure 3.

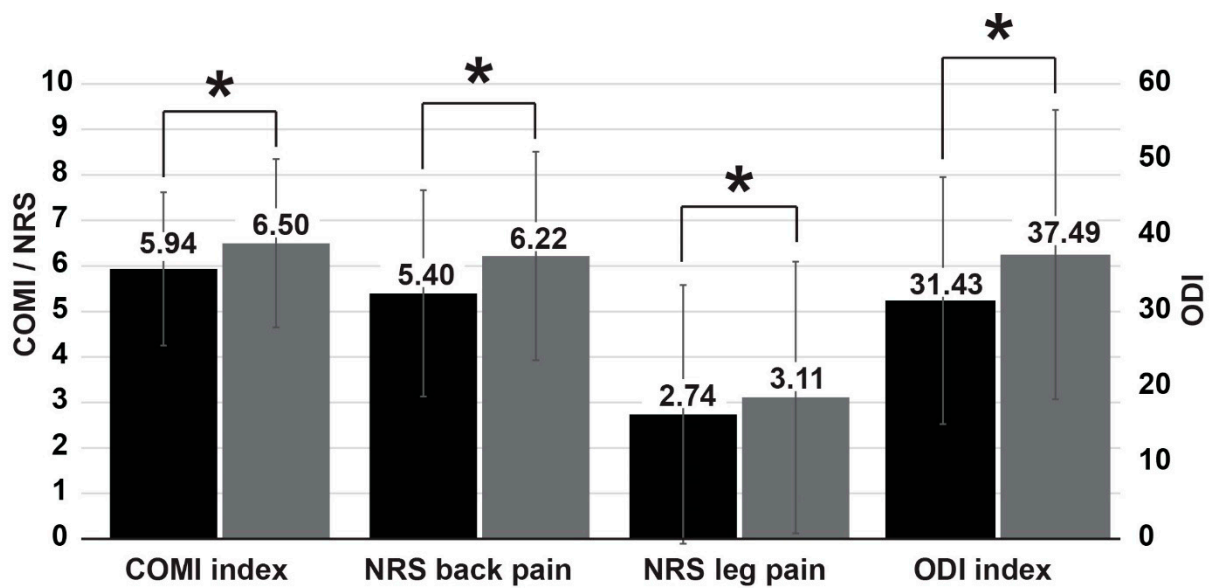


Figure 3. Pain-related disability. Black bars: symmetrical group; grey bars: asymmetrical group. * $p < 0.05$.

In terms of the RFs, there was a significantly greater proportion of respondents who declared a history of trauma in APG (21.41 vs. 10.71 $p < 0.001$). On the contrary, the remaining RFs—weight loss (6.70 vs. 1.76 $p < 0.001$) and fever (4.91 vs. 2.14 $p < 0.001$)—were significantly more frequent in SPG (Figure 4).

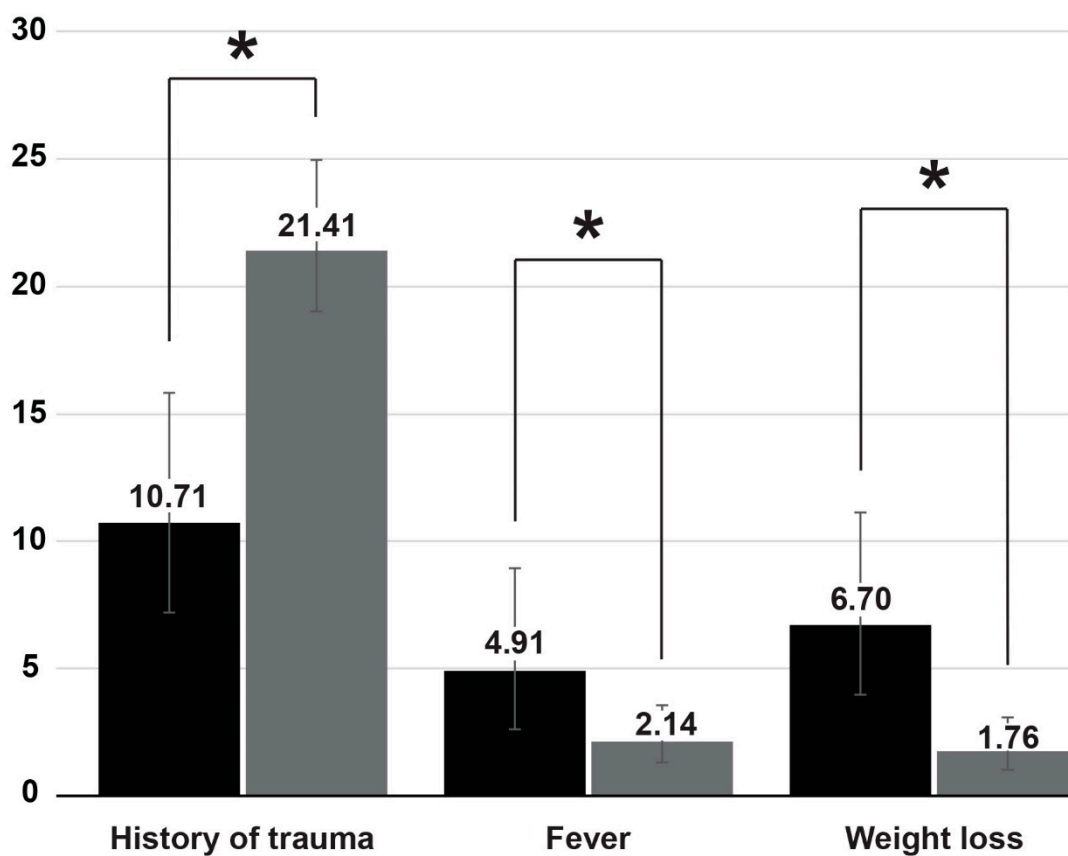


Figure 4. Prevalence of red flags. Black bars: symmetrical group; grey bars: asymmetrical group. * $p < 0.05$.

The internal consistency of the data was high, with a Cronbach's alpha value of 0.90 for the ODI and 0.84 for the COMI.

3. Discussion

PMs have been used in clinical settings for decades. Over the years, they underwent a significant evolution from simple pen-on-paper charts into advanced 3D multifaceted instruments [11], with digital technologies playing a key role in this process. This concept is in line with the pursuit for more personalized medicine, with a demand for new modalities for the recording and quantification of pain experiences, such as pain location, intensity, and area [16]. One of the advantages of modern pain maps are their easiness for screening large populations. This study was designed to explore the suitability of PMs of LBP to screen for serious pathologies, and to supplement the classical RFs. With a tremendous overall burden of LBP, it is of key importance to employ simple yet effective screening tools to detect serious health issues. To address this necessity, RF screening questions have been developed and embraced for use in the detection of potentially serious spine pathologies in either the primary or multidisciplinary care [17]. Their negative predictive value is excellent, close to 99%, but their positive predictive value is very low [18]. The working hypothesis of this study was that PMs may be a source of useful data that could enhance the predictive capabilities of RFs. It has already been shown that the pain location and its referral pattern reported by the patient can be a reliable indicator of the structural source of LBP [19]. We looked at the symmetry of the pain patterns about the midline as a parameter, which was easy to compute. The pain diagram used in this study was a rather simplistic gender-specific 2D body chart similar to that from the publication of Egsgaard et al., who first reported that patients believed sex-specific body charts facilitated the communication of pain [20].

The key finding of this work was that the distribution of RFs was dependent on the pain symmetry. The history of trauma was more frequent in APG. One plausible explanation for this is that two common causes of pain are the myofascial syndrome [21] and lumbar facet osteoarthritis [22]. Both are likely to produce asymmetrical symptoms. As the vast majority of patients complained of chronic pain, rather than acute pain, with no significant differences between the groups, the highly prevalent acute lumbar sprains were not likely to affect the outcomes of this study. On the other hand, the remaining RFs, i.e., weight loss and history of fever, were more likely in SPG. The significance of this finding requires further research, as with a very low positive predictive value for these flags, it is unlikely that the group studied included even a single case of tumor and/or spinal infection. The overall prevalence of RFs was similar to a previous study that used a similar Web survey [23].

It was also found in this study that the pain-related disability in APG was significantly higher than in SPG, as measured using both ODI and COMI. Similarly, the pain intensity measured with the NRS for backs and legs was higher in the APG group. These results show that asymmetrical pain, which may be considered “non-discogenic” [19], is more severe for patients. It is noteworthy that we excluded patients with pain radiating below the knee. Thus, the patients with pure radicular pain were excluded. The differences in disability between groups showed that APG and SPG contain different clinical entities with distinct clinical presentations.

4. Limitations

As this study was based on an open anonymous web survey, there was a question regarding the reliability and validity of data. The data integrity was assessed by calculating the Cronbach’s alpha for the ODI and COMI, which confirmed a good internal consistency, which was similar to the data coming from clinical studies [15,24]. Another limitation was the very low positive predictive value of RFs. It is very unlikely that, despite the fairly large population included in this study, there were very few respondents with a true positive RF, i.e., with a serious pathology. Clinical validation is required to associate pain patterns with serious underlying cause. Last but not least, the risk of bias in a study of this type is difficult to assess. The selection bias, for instance, should not be of concern, as Internet users are considered highly representative of the general population [25]. On the

other hand, there is a significant risk of information bias. For the sake of minimizing the respondent burden, questions regarding possible covariates, such as BMI or smoking, were not included, and further research is required.

5. Conclusions

To the best of our knowledge, this is the first study on the symmetry of back pain using PM. It is shown that APG and SPG demonstrate distinctive features such as the prevalence of RFs and the pain-related disability. The exact clinical relevance requires validation.

Author Contributions: Conceptualization, G.M. and R.Z.; methodology, G.M., A.D. and R.Z.; software, G.M.; validation, G.M.; formal analysis, G.M. and D.S.; investigation, G.M., D.S., S.D.P., J.F. and A.D.; data curation, S.D.P., J.F., A.D., writing—original draft preparation, G.M., S.D.P. and J.F.; writing—review and editing, G.M., S.D.P., J.F. and A.D.; visualization, G.M., S.D.P., J.F. and C.P.; supervision, G.M., R.Z. and C.P.; project administration, G.M., C.P. and D.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: The study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki, Institutional Review Board approval was waived as this was an observational study based on data which were entirely anonymous.

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from each subject beforehand.

Data Availability Statement: The original dataset is available at: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1CI9xirJcGdFUuXvPAjVAamapt-75JHx/edit?usp=sharing&ouid=105300947326623048589&rtopof=true&sd=true>.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Meucci, R.D.; Fassa, A.G.; Faria, N.M.X. Prevalence of chronic low back pain: Systematic review. *Rev. Saude Publica* **2015**, *49*, 1. [CrossRef]
2. Deyo, R.A.; Weinstein, J.N. Low Back Pain. *N. Engl. J. Med.* **2001**, *344*, 363–370. [CrossRef] [PubMed]
3. Hoy, D.; Brooks, P.; Blyth, F.; Buchbinder, R. The Epidemiology of Low Back Pain. *Best Pract. Res. Clin. Rheumatol.* **2010**, *24*, 769–781. [CrossRef] [PubMed]
4. Koes, B.W.; van Tulder, M.; Lin, C.W.C.; Macedo, L.G.; McAuley, J.; Maher, C. An Updated Overview of Clinical Guidelines for the Management of Non-Specific Low Back Pain in Primary Care. *Eur. Spine J.* **2010**, *19*, 2075–2094. [CrossRef] [PubMed]
5. Henschke, N.; Maher, C.G.; Ostelo, R.W.; De Vet, H.C.; Macaskill, P.; Irwig, L. Red flags to screen for malignancy in patients with low-back pain. *Cochrane Database Syst. Rev.* **2013**. [CrossRef] [PubMed]
6. Williams, C.M.; Henschke, N.; Maher, C.G.; Van Tulder, M.W.; Koes, B.W.; Macaskill, P.; Irwig, L. Red flags to screen for vertebral fracture in patients presenting with low-back pain. *Cochrane Database Syst. Rev.* **2013**, CD008643. [CrossRef]
7. Airaksinen, O.; Brox, J.I.; Cedraschi, C.; Hildebrandt, J.; Klüber-Moffett, J.; Kovacs, F.; Mannion, A.F.; Reis, S.; Staal, J.B.; Ursin, H.; et al. Chapter 4 European guidelines for the management of chronic nonspecific low back pain. *Eur. Spine J.* **2006**, *15*, s192–s300. [CrossRef]
8. DePalma, M.J.; Ketchum, J.; Trussell, B.S.; Saullo, T.R.; Slipman, C.W. Does the Location of Low Back Pain Predict Its Source? *PM&R* **2011**, *3*, 33–39. [CrossRef]
9. Boudreau, S.A.; Royo, A.C.; Matthews, M.; Graven-Nielsen, T.; Kamavuako, E.N.; Slabaugh, G.; Thorborg, K.; Vicenzino, B.; Rathleff, M.S. Distinct patterns of variation in the distribution of knee pain. *Sci. Rep.* **2018**, *8*, 16522. [CrossRef]
10. Bertilson, B.; Grunnesjö, M.; Johansson, S.-E.; Strender, L.-E. Pain Drawing in the Assessment of Neurogenic Pain and Dysfunction in the Neck/Shoulder Region: Inter-Examiner Reliability and Concordance with Clinical Examination. *Pain Med.* **2007**, *8*, 134–146. [CrossRef]
11. Matthews, M.; Rathleff, M.S.; Vicenzino, B.; Boudreau, S.A. Capturing patient-reported area of knee pain: A concurrent validity study using digital technology in patients with patellofemoral pain. *PeerJ* **2018**, *6*, e4406. [CrossRef]
12. Shaballout, N.; Neubert, T.-A.; Boudreau, S.; Beissner, F. From Paper to Digital Applications of the Pain Drawing: Systematic Review of Methodological Milestones. *JMIR mHealth uHealth* **2019**, *7*, e14569. [CrossRef]
13. Shaballout, N.; Aloumar, A.; Neubert, T.-A.; Dusch, M.; Beissner, F. Digital Pain Drawings Can Improve Doctors' Understanding of Acute Pain Patients: Survey and Pain Drawing Analysis. *JMIR mHealth uHealth* **2019**, *7*, e11412. [CrossRef]
14. Eysenbach, G. Improving the Quality of Web Surveys: The Checklist for Reporting Results of Internet E-Surveys (CHERRIES). *J. Med. Internet Res.* **2004**, *6*, e34. [CrossRef]

15. Miekisiak, G.; Łatka, D.; Sobolewski, T.; Sulewski, A.; Kubaszewski, L.; Kaczmarczyk, J. Prevalence of “Red Flags” Among the Internet User with Low Back Pain Seeking Information on Spinal Health—A Web Survey. *Telemed. e-Health* **2015**, *21*, 120–124. [[CrossRef](#)]
16. Herzog, W.; Nigg, B.M.; Read, L.J.; Olsson, E. Asymmetries in ground reaction force patterns in normal human gait. *Med. Sci. Sports Exerc.* **1989**, *21*, 110–114. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
17. Campbell, I. Chi-squared and Fisher–Irwin tests of two-by-two tables with small sample recommendations. *Stat. Med.* **2007**, *26*, 3661–3675. [[CrossRef](#)]
18. Bruehl, S.; Apkarian, A.V.; Ballantyne, J.C.; Berger, A.; Borsook, D.; Chen, W.G.; Farrar, J.T.; Haythornthwaite, J.A.; Horn, S.D.; Iadarola, M.J.; et al. Personalized Medicine and Opioid Analgesic Prescribing for Chronic Pain: Opportunities and Challenges. *J. Pain* **2013**, *14*, 103–113. [[CrossRef](#)]
19. Verhagen, A.P.; Downie, A.; Popal, N.; Maher, C.; Koes, B.W. Red flags presented in current low back pain guidelines: A review. *Eur. Spine J.* **2016**, *25*, 2788–2802. [[CrossRef](#)]
20. Premkumar, A.; Godfrey, W.; Gottschalk, M.B.; Boden, S.D. Red Flags for Low Back Pain Are Not Always Really Red: A Prospective Evaluation of the Clinical Utility of Commonly Used Screening Questions for Low Back Pain. *J. Bone Jt. Surg. Am. Vol.* **2018**, *100*, 368–374. [[CrossRef](#)]
21. Laplante, B.L.; Ketchum, J.M.; Saullo, T.R.; DePalma, M.J. Multivariable analysis of the relationship between pain referral patterns and the source of chronic low back pain. *Pain Physician* **2012**, *15*, 171–178.
22. Egsgaard, L.L.; Christensen, T.S.; Petersen, I.M.; Brønnum, D.S.; Boudreau, S.A.; Ghinea, G.; Schilder, A.; Castrillon, E. Do Gender-Specific and High-Resolution Three Dimensional Body Charts Facilitate the Communication of Pain for Women? A Quantitative and Qualitative Study. *JMIR Hum. Factors* **2016**, *3*, e19. [[CrossRef](#)]
23. Partanen, J.V.; Ojala, T.A.; Arokoski, J.P. Myofascial syndrome and pain: A neurophysiological approach. *Pathophysiology* **2010**, *17*, 19–28. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Kalichman, L.; Hunter, D.J. Lumbar Facet Joint Osteoarthritis: A Review. *Semin. Arthritis Rheum.* **2007**, *37*, 69–80. [[CrossRef](#)]
25. Van Gelder, M.M.H.J.; Bretveld, R.W.; Roeleveld, N. Web-based Questionnaires: The Future in Epidemiology? *Am. J. Epidemiol.* **2010**, *172*, 1292–1298. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]



Article

Evaluation of Movement Restriction of Spinal Orthoses Using Inertial Measurement Units

Justyna Fercho ^{1,*} , Michał Krakowiak ¹ , Rami Yuser ², Tomasz Szmuda ¹ , Piotr Zieliński ¹, Dariusz Szarek ³, Samuel D. Pettersson ² and Grzegorz Miękiński ⁴

¹ Neurosurgery Department, Medical University of Gdansk, 80-214 Gdańsk, Poland

² Scientific Circle of Neurology and Neurosurgery, Neurosurgery Department, Medical University of Gdansk, 80-214 Gdańsk, Poland

³ Department of Neurosurgery, Marciniak's Hospital, 54-049 Wrocław, Poland

⁴ Institute of Medicine, Opole University, 45-052 Opole, Poland

* Correspondence: jfercho@uck.gda.pl

Abstract: Despite the frequent use of orthopedic braces or spine stabilizers in diseases such as kyphosis, lordosis, and scoliosis, as well as in the case of injuries and rehabilitation after surgeries, there is no clear evidence of their proper stabilization of the spine while carrying out daily activities. This study sought to assess the spine's mobility while wearing three different orthopedic braces while performing basic tasks. Ten healthy subjects were enrolled. Three Inertial Measurement Units (IMUs) were attached superficially along the spine at approximate levels: cervical (C7), between thoracic (T8) and lumbar (L3), and sacrum. The angle between sensors was monitored to provide data on the sagittal profile. In addition, the displacement of the spine's longitudinal axis was measured (rotation). There are three types of orthopedic braces: the semi-rigid Hohmann corset, the Jewett brace, and the Thoracolumbar Fixed Spinal Orthosis (TLSO). Four tasks were monitored: standing, sitting, walking, and picking up an item from the floor with one hand. All braces provided a similar level of stability in both the sagittal plane and rotational axis while lifting an object. On the other hand, while walking and sitting, the TLSO was the only orthosis providing a statistically significant rigidity in the sagittal plane. When performing a more voluntary task, the measured rigidity of softer braces was significantly increased when compared with more involuntary tasks. A certain degree of motion restriction with spinal orthoses may come from the feedback pressure, which stimulates paraspinal muscles to contract and thus increases the overall rigidity of the trunk.

Keywords: spine; motion analysis; wearable sensors; biomechanics; brace; orthosis



Citation: Fercho, J.; Krakowiak, M.; Yuser, R.; Szmuda, T.; Zieliński, P.; Szarek, D.; Pettersson, S.D.; Miękiński, G. Evaluation of Movement Restriction of Spinal Orthoses Using Inertial Measurement Units. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2022**, *19*, 16515. <https://doi.org/10.3390/ijerph192416515>

Academic Editor: Paul B. Tchounwou

Received: 31 October 2022

Accepted: 7 December 2022

Published: 8 December 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Spinal orthoses are external braces used as a primary or supplementary aid for vertebrae immobilization in various spinal disorders. Based on their function, orthoses can be divided into three categories: supportive orthoses (for temporary pain), immobilization orthoses (for severe pain, e.g., spinal trauma and post-op treatment), and corrective orthoses (primarily for pediatric patients with idiopathic spinal deformity). There are specific braces for each spine segment (e.g., cervical, thoracic, lumbar, sacral, and in combinations). Common medical conditions treated with bracing are fractures, spinal deformities, and non-specific low back pain. They are often used as a supplement after the surgical treatment of the thoracolumbar spine. In pediatric patients, orthotic therapy is often used to rectify congenital spinal deformity (idiopathic or related to neuromuscular diseases). Spinal bracing has three prime objectives [1]: pain control by restricting motion as well as by unloading specific structures of the spine (discs, vertebral bodies, facets); stabilizing weakened or damaged structures; and providing three-point support to correct and prevent progression of the deformity.

The effectiveness of bracing is highly controversial for most of the applications, except for low-grade adolescent deformity [2]. Although there is insufficient evidence to support the use of spinal orthoses in thoracolumbar burst fractures [3] and acute osteoporotic vertebral compression fractures [4], they are still in use due to the common-sense approach of immobilizing the injured organon. Our study was designed to evaluate the spine's mobility while wearing three different types of orthopedic braces while performing certain rudimentary tasks.

2. Materials and Methods

This study includes 10 subjects from the Medical University of Gdansk. Inclusion criteria comprised no past medical history of spine diseases, spine surgery or injury; no thoracolumbar pain; no neurological deficits; and any other symptom that could indicate a pathological process compromising the spine's mobility. Participants were in the healthy weight range (Body Mass Index (BMI) between 18.5 and 24.9) and were not burdened with diseases that could affect the musculoskeletal system or impair their efficiency. Each participant signed a written consent before contributing to this study. The local ethics committee approved the study at the Medical University of Gdansk (NKBBN/145/2021). The 9-axis MetaMotionR (MbiEntlab, San Francisco, CA, USA) Inertial Measurement Units (IMUs) were firmly attached to three distinct points on the subject's body. Each IMU is consisted of a 6-axis accelerometer + gyroscope and a 3-axis magnetometer for a real-time 9-axis sensor fusion. The first was attached to the most prominent spinous process in the cervical region (typically the C7 level), the second to the nadir of the lumbar concavity (typically at the L3 vertebra), and the third was attached midway between the two aforementioned points (around T8). Two values were then calculated: the difference between the C7 and L3 inclinations (C7L3) and between the T8 and L3 inclinations (T8L3), which translated into the inclinations of almost the entire TL spine and TL junction, respectively.

The braces used in this study were: the Jewett brace, the Hohmann-type lace brace, and the Thoracolumbar Fixed Spinal Brace (TLSO) (Figure 1). The first one is a flexion control (hyperextension) three-point orthosis, the second is a semi-rigid corset, and the last is a tri-planar control device with a rigid frame. Each device was worn according to preset instructions and adjusted individually for each subject. The Physics Toolbox Sensor Suite Pro version 1.9.1 (MbiEntLab) was installed on the researcher's smartphone and connected with the IMUs through Bluetooth to calibrate and register the measurements. The sampling frequency rate in the application was set to 100 Hz. Subjects were asked to perform the following tasks: stand, walk, sit, and lift an object from the ground using only one hand while wearing the above-mentioned braces (Figure 2). The data on sagittal displacement were analyzed with each task, and in addition, the relative rotation between sensors was measured for the lifting task. The baseline for the analysis of flexibility was the standing posture. Participants were also asked to fill out the five-item Likert-type questionnaire on subjective discomfort experienced while using each of the orthoses. The questionnaire that was used in this study is a significantly condensed version of one proposed by Curfts et al. [5] (Table 1).

Table 1. The questionnaire on the comfort of each brace. Based on Curfts et al. [5].

Sl. No.	Criteria	Rating
1.	... is comfortable	1 2 3 4 5
2.	... causes no pain	1 2 3 4 5
3.	... does not pinch	1 2 3 4 5
4.	... can easily be worn under clothes	1 2 3 4 5
5.	... is easy and quick to use	1 2 3 4 5



Figure 1. The orthoses used in the study (a)—Hohmann-type lace brace, (b)—Jewett orthosis, (c)—TLSO.



Figure 2. The task of lifting an object from the floor while wearing the Jewett brace.

3. Results

Data from the sitting and walking exercises revealed that the TLSO provided the highest limitation for both T8L3 and C7L3. The Hohmann brace was maximally displaced while sitting (Figure 3) with movement in C7L3 being 15.18 deg (SD 3.21) and in T8L3 being 8.97 deg. (SD 2.72). While walking, the TLSO provided the greatest restriction of movement in the sagittal plane (Figure 4). Mobility was minimal while using this orthosis: C7L3 was 3.07 deg. (SD 0.86), and T8L3 was 1.12 deg. (SD 0.47). The difference in the values for TLSO was statistically significant at $p < 0.05$. It was significantly different from the Hohmann brace ($p < 0.05$) and the Jewett brace ($p < 0.01$). Interestingly, for the dynamic task of lifting an object from the floor, the most rigid orthosis was the Hohmann brace, and TLSO was the least effective (Figure 5). The maximum displacement for the former at C7L3 was 1.29 deg. (SD 0.66) and at T8L3 was 3.31 deg. (SD 0.53). The difference between these two orthoses was statistically significant at $p < 0.05$. Referring to rotation, the movement in the TL area

was nearly eliminated while utilizing both the Hohmann brace as well as the TLSO with T8L3 at 0.98 deg. (SD 0.93) and 0.69 deg. (SD 0.31), respectively (Figure 6). However, the difference was not statistically significant. There was a significantly greater movement of the entire C7L3 segment, with the highest value of 3.99 deg. (SD 0.16) for the Hohmann brace and the lowest for TLSO at 1.71 deg. (SD 0.29). According to the questionnaire, the most comfortable brace was the Hohmann-type lace orthosis, with an average score of 4.50 (SD 0.15). The TLSO and Jewett braces were significantly less comfortable, with a score of 3.27 (SD 0.26) and 3.30 (SD 0.19), respectively.

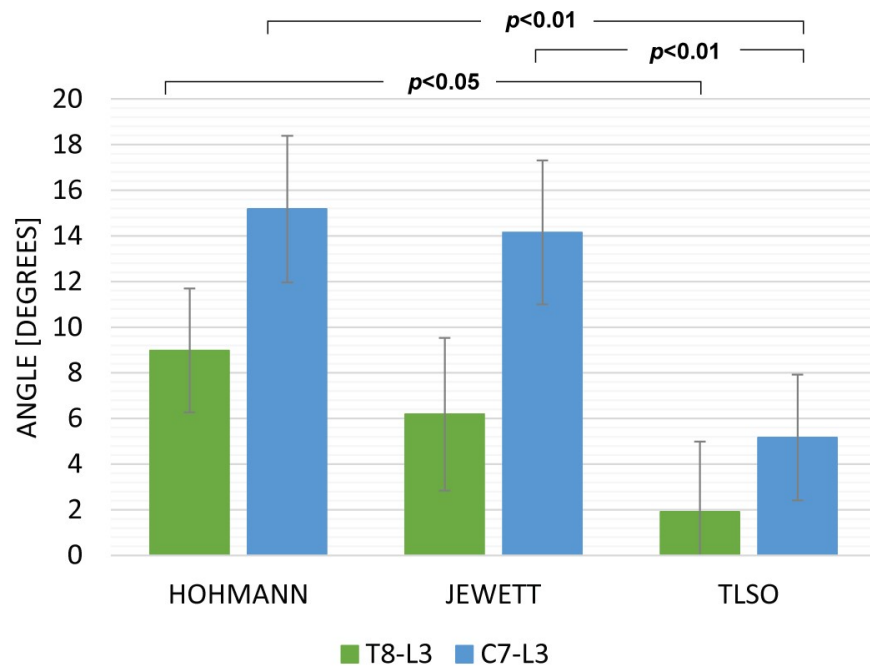


Figure 3. The maximum sagittal inclination during sitting.

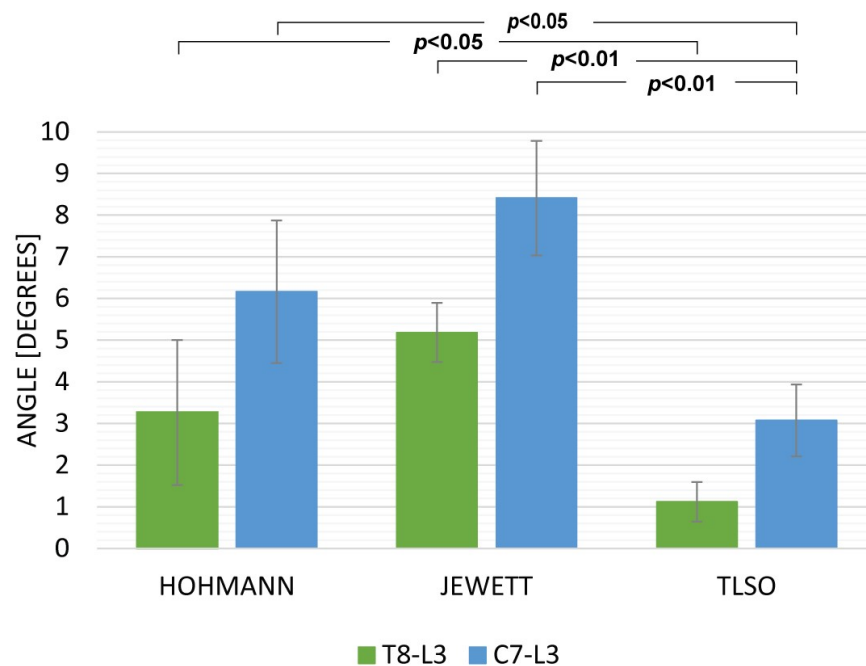


Figure 4. The maximum sagittal inclination while walking.

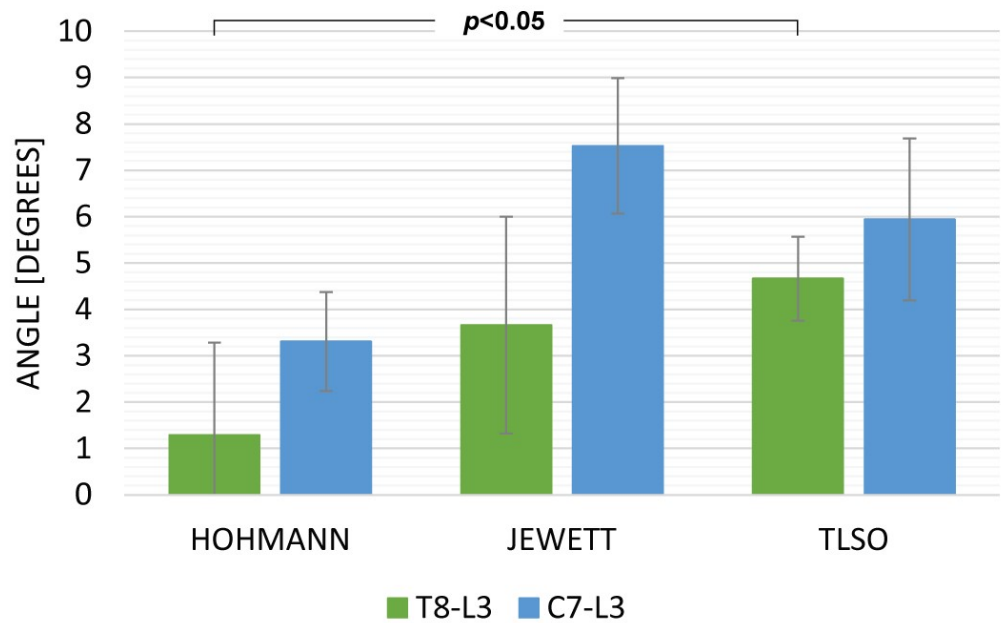


Figure 5. The maximum sagittal inclination while lifting an object from the floor.

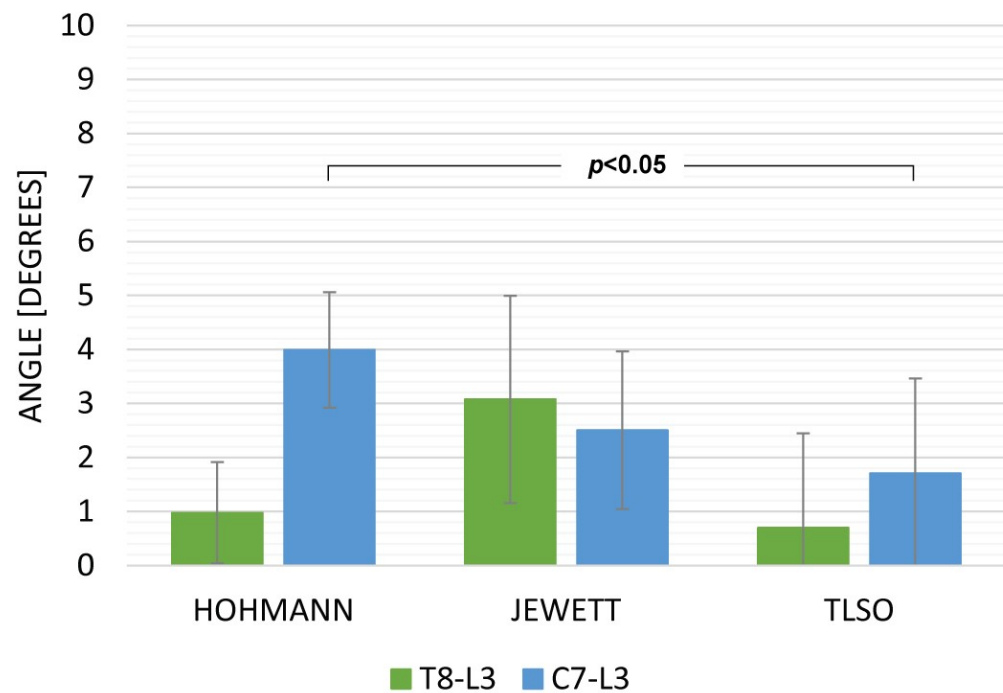


Figure 6. A graphical representation of the maximum axial rotation while lifting an object from the floor.

4. Discussion

Spinal orthoses are popular comprehensive treatments for various spinal disorders. They present a leading therapy for moderate to severe idiopathic scoliosis during the developmental phase [6]. Spinal braces operate through two basic mechanisms of action. One approach is to increase the intra-abdominal pressure, thus reducing the net force applied to the spine and thus decreasing the stress exerted on the spine [7]. However, most orthoses provide a three-point fixation to maintain the spine in a favorable posture, which offloads some larger compressive forces [8]. The braces used in our study constitute both mechanisms: The Hohmann lace brace utilizes the former mechanism, the Jewett

brace represents the latter type, and TLSO is a blend of both. Bracing of the spine is a choice method for the nonoperative treatment of thoracolumbar fractures [9], although its efficacy has often been challenged. A recent meta-analysis by Wallace et al. [10] failed to demonstrate any improvement in either clinical or radiographic outcomes. The study further claimed that using braces increases patient morbidity and incurs high costs without any clinical benefit. Bracing is also a predominant alternative for the treatment of vertebral osteoporotic compression fractures. However, this method has been under continuous scrutiny for years. The authors of a recent meta-analysis [11] showed that there is insufficient evidence to demonstrate the superiority of a rigid brace over a soft brace or no brace. Nevertheless, the most controversial yet widespread use of spinal bracing is in the treatment of non-specific low back pain, be it acute [12] or chronic [13]. Although it has been shown that orthoses improve posture and control in patients with non-specific low back pain [14], the evidence to support this application is scarce [15]. For years the braces were believed to cause trunk muscle weakness; however, this concept has not been proven by adequate evidence either [16,17].

Perhaps the major confounder in all studies concerned with the clinical efficacy of braces is the actual motion restriction that may or may not be related directly to the perceived rigidity of the orthosis. We designed our study to evaluate the orthoses through common everyday activities: standing, walking, and sitting. We also added the task of lifting an object from the floor as a test for extreme displacement. We chose this approach to reproduce the physiological loads acting on the orthoses while performing activities of everyday life. This approach differs from other studies concerned with the topic. The study by Lang et al. [18] investigated the maximum range of motion of thoracolumbar spine in 12 volunteers wearing three different braces with various levels of rigidity. The measurements were assessed using a 3D motion capture system. Their results supported the hypothesis that custom-made braces, being more rigid, provide better restriction of motion in all planes. We believe our approach resembles the conditions of the everyday life of patients when extreme displacements are rare. In a similar study, IMUs were used by Curfts et al. [5]; however, only a single sensor placed in the sacral region was used, and as it was not capable of sensor fusion, it provided data on an angular rate that was converted to attitude (inclination). The subjects in their study were asked to perform five routine tasks without wearing an orthosis and four different tasks while wearing one. In conclusion, the authors asserted that the most rigid braces provided the most effective motion restriction.

The assessment of orthoses with activities resembling daily living was made possible with the introduction of IMUs. They have become increasingly popular in the field of musculoskeletal research with their potential for novel studies. They provide a good alternative to laboratory-based systems, which provide data that are not applicable to real-life contexts [19]. IMUs are now commonly used for the clinical analysis of movement [20]. The MetaMotionR device used in the present study was validated for objective assessments of functional movement of the lumbar spine by Beange et al. [21]. The introduction of sensor fusion technology has significantly increased the prospects for future studies.

Despite various levels of perceived rigidity, the performance of the tested orthoses was comparable in the voluntary task of picking up an item from the floor. This is in contrast to more involuntary exercises such as walking and sitting. It has been proposed that spinal orthoses act by enhancing the awareness of one's body posture via biofeedback [22]. It is possible that the orthoses worn by subjects performing more deliberate activities may trigger a contraction of lower back muscles, thus increasing the overall rigidity of the torso. The authors of a prospective study that evaluated the effectiveness of the dynamic corset versus the three-point brace [23] came up with an interesting hypothesis explaining the mechanism of action of less rigid spinal orthoses. According to them, the preservation of partial movement coupled with a dynamic behavior triggers biofeedback and activation of the paraspinal musculature. When the patient tries to bend forward, the device exerts a delicate pressure stimulating the dorsal muscles to contract. Broadly stating, softer braces do not provide factual support but act as a reminder to retain a correct posture. On the

other hand, more sophisticated braces, such as TLSO, are cumbersome and impractical for everyday use except when indispensable. New intelligent materials [24,25] should provide better control of posture without compromising comfort.

5. Limitations of the Study

Although we perpetually strive for excellence, we also acknowledge our shortcomings. For instance, we have not performed a formal validation of sensors with the setup used in this study but rather took advantage of previous work executed by Zhou et al. [26], which found the sensors to be reliable and cost-effective. We took great care to firmly place the sensors. However, due to limitations in controlling the position of sensors under the brace, small changes in attitude were possible. Again, the study evaluated spine mobility in healthy subjects, which is vastly different from assessing real-life patients. On the other hand, this approach also reduces heterogeneity and allows focus solely on the mechanical properties of braces. Not least of all, we did not take into account the changes in abdominal pressure. Monitoring this value would have provided favorable support to the findings reported in the present study.

6. Conclusions

The measured rigidity of softer braces was significantly pronounced while performing voluntary tasks in comparison to rigidity observed in involuntary tasks. The available data do not allow exact explanations of this finding and further research is imperative.

Author Contributions: Conceptualization, R.Y. and G.M.; Methodology, S.D.P. and G.M.; Software, J.F. and D.S.; Formal analysis, M.K. and R.Y.; Resources, M.K. and D.S.; Data curation, M.K.; Writing—original draft, G.M.; Writing—review & editing, S.D.P. and G.M.; Visualization, G.M.; Supervision, P.Z.; Project administration, J.F. and T.S.; Funding acquisition, J.F., T.S. and G.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The study was funded by the Ministry of Science and Higher Education in Poland grant number SKN/SP/498545/2021.

Institutional Review Board Statement: The study was approved by the local ethics committee at the Medical University of Gdansk (approval number: NKBBN/145/2021). It was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki.

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Weppner, J.L.; Alfano, A.P. Principles and Components of Spinal Orthoses. In *Atlas of Orthoses and Assistive Devices*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019; pp. 69–89.e2. [\[CrossRef\]](#)
2. Kaelin, A.J. Adolescent Idiopathic Scoliosis: Indications for Bracing and Conservative Treatments. *Ann. Transl. Med.* **2020**, *8*, 28. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
3. Schwab, F. Treatment with or without an Orthosis Is Equivalent for Thoracolumbar Burst Fracture without Neurologic Injury. *J. Bone Jt. Surg.—Am. Vol.* **2015**, *97*, 1374. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
4. Kato, T.; Inose, H.; Ichimura, S.; Tokuhashi, Y.; Nakamura, H.; Hoshino, M.; Togawa, D.; Hirano, T.; Haro, H.; Ohba, T.; et al. Comparison of Rigid and Soft-Brace Treatments for Acute Osteoporotic Vertebral Compression Fracture: A Prospective, Randomized, Multicenter Study. *J. Clin. Med.* **2019**, *8*, 198. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
5. Curfs, I.; van Rooij, W.; Senden, R.; Grimm, B.; van Hemert, W. Evaluating the Immobilization Effect of Spinal Orthoses Using Sensor-Based Motion Analysis. *J. Prosthet. Orthot.* **2016**, *28*, 23–29. [\[CrossRef\]](#)
6. Negrini, S.; Aulisa, A.G.; Aulisa, L.; Circo, A.B.; de Mauroy, J.C.; Durmala, J.; Grivas, T.B.; Knott, P.; Kotwicki, T.; Maruyama, T.; et al. 2011 SOSORT Guidelines: Orthopaedic and Rehabilitation Treatment of Idiopathic Scoliosis during Growth. *Scoliosis* **2012**, *7*, 3. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
7. Agabegi, S.S.; Asghar, F.A.; Herkowitz, H.N. Spinal Orthoses. *J. Am. Acad. Orthop. Surg.* **2010**, *18*, 657–667. [\[CrossRef\]](#)

8. Johnson, D.D.; Ashton-Miller, J.A.; Shih, A.J. Active Spinal Orthosis to Reduce Lumbar Postural Muscle Activity in Flexed Postures. *J. Prosthet. Orthot.* **2016**, *28*, 109–113. [[CrossRef](#)]
9. Van der Roer, N.; de Lange, E.S.M.; Bakker, F.C.; de Vet, H.C.W.; van Tulder, M.W. Management of Traumatic Thoracolumbar Fractures: A Systematic Review of the Literature. *Eur. Spine J.* **2005**, *14*, 527–534. [[CrossRef](#)]
10. Wallace, N.; McHugh, M.; Patel, R.; Aleem, I.S. Effects of Bracing on Clinical and Radiographic Outcomes Following Thoracolumbar Burst Fractures in Neurologically Intact Patients a Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *JBS Rev.* **2019**, *7*, e9. [[CrossRef](#)]
11. Hofler, R.C.; Jones, G.A. Bracing for Acute and Subacute Osteoporotic Compression Fractures: A Systematic Review of the Literature. *World Neurosurg.* **2020**, *141*, e453–e460. [[CrossRef](#)]
12. Casazza, B.A. Diagnosis and Treatment of Acute Low Back Pain. *Am. Fam. Physician* **2012**, *85*, 343–350. [[PubMed](#)]
13. Annaswamy, T.M.; Cunniff, K.J.; Kroll, M.; Yap, L.; Hasley, M.; Lin, C.K.; Petrasic, J. Lumbar Bracing for Chronic Low Back Pain: A Randomized Controlled Trial. *Am. J. Phys. Med. Rehabil.* **2021**, *100*, 742–749. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
14. Mi, J.; Ye, J.; Zhao, X.; Zhao, J. Effects of Lumbosacral Orthoses on Postural Control in Individuals with or without Non-Specific Low Back Pain. *Eur. Spine J.* **2018**, *27*, 180–186. [[CrossRef](#)]
15. Van Duijvenbode, I.C.D.; Jellema, P.; van Poppel, M.N.M.; van Tulder, M.W. Lumbar Supports for Prevention and Treatment of Low Back Pain. *Cochrane Database Syst. Rev.* **2008**, *2008*, CD001823. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Takasaki, H.; Miki, T. The Impact of Continuous Use of Lumbosacral Orthoses on Trunk Motor Performance: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Spine J.* **2017**, *17*, 889–900. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
17. Azadinia, F.; Ebrahimi, E.; Kamyab, M.; Parnianpour, M.; Cholewicki, J.; Maroufi, N. Can Lumbosacral Orthoses Cause Trunk Muscle Weakness? A Systematic Review of Literature. *Spine J.* **2017**, *17*, 589–602. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
18. Lang, G.; Hirschmüller, A.; Patermann, S.; Eichelberger, P.; Strohm, P.; Baur, H.; Südkamp, N.P.; Herget, G.W. Efficacy of Thoracolumbar Bracing in Spinal Immobilization: Precise Assessment of Gross, Intersegmental, and Segmental Spinal Motion Restriction by a 3D Kinematic System. *World Neurosurg.* **2018**, *116*, e128–e146. [[CrossRef](#)]
19. Poitras, I.; Dupuis, F.; Biemann, M.; Campeau-Lecours, A.; Mercier, C.; Bouyer, L.J.; Roy, J.S. Validity and Reliability of Wearable Sensors for Joint Angle Estimation: A Systematic Review. *Sensors* **2019**, *19*, 1555. [[CrossRef](#)]
20. Al-Amri, M.; Nicholas, K.; Button, K.; Sparkes, V.; Sheeran, L.; Davies, J.L. Inertial Measurement Units for Clinical Movement Analysis: Reliability and Concurrent Validity. *Sensors* **2018**, *18*, 719. [[CrossRef](#)]
21. Beange, K.H.E.; Chan, A.D.C.; Beaudette, S.M.; Graham, R.B. Concurrent Validity of a Wearable IMU for Objective Assessments of Functional Movement Quality and Control of the Lumbar Spine. *J. Biomech.* **2019**, *97*, 109356. [[CrossRef](#)]
22. Pfeifer, M.; Gehlen, M.; Hinz, C. Spinal Orthoses in the Treatment of Vertebral Fractures with Osteoporosis: A Systematic Review Article. *Z. Rheumatol.* **2017**, *76*, 860–868. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
23. Meccariello, L.; Muzii, V.F.; Falzarano, G.; Medici, A.; Carta, S.; Fortina, M.; Ferrata, P. Dynamic Corset versus Three-Point Brace in the Treatment of Osteoporotic Compression Fractures of the Thoracic and Lumbar Spine: A Prospective, Comparative Study. *Aging Clin. Exp. Res.* **2016**, *29*, 443–449. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Ehrenhofer, A.; Wallmersperger, T. Shell-Forming Stimulus-Active Hydrogel Composite Membranes: Concept and Modeling. *Micromachines* **2020**, *11*, 541. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. Sadeghian, F.; Zakerzadeh, M.R.; Karimpour, M.; Baghani, M. Compliant Orthoses for Repositioning of Knee Joint Based on Super-Elasticity of Shape Memory Alloys. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **2018**, *29*, 3136–3150. [[CrossRef](#)]
26. Zhou, L.; Fischer, E.; Tunca, C.; Brahms, C.M.; Ersoy, C.; Granacher, U.; Arnrich, B. How We Found Our IMU: Guidelines to IMU Selection and a Comparison of Seven IMUs for Pervasive Healthcare Applications. *Sensors* **2020**, *20*, 4090. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]